

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE  
Faculté de génie  
Département de génie civil

ÉVALUATION CRITIQUE DU PRINCIPE  
D'ÉCONOMIE CIRCULAIRE EN BOUCLE  
OUVERTE VIA DEUX EXEMPLES DE  
VALORISATION DU VERRE MIXTE.

Mémoire de maîtrise  
Spécialité : génie civil

Joris DESCHAMPS



## MEMBRES DU JURY

Ben AMOR (Ph.D)

Directeur

Arezki TAGNIT-HAMOU (Ph.D)

Codirecteur

Hubert CABANA (Ph.D)

Rapporteur

Stéphanie MULLER (Ph.D)

Évaluatrice externe

---

# RÉSUMÉ FRANÇAIS

Comment permettre une meilleure utilisation des ressources ? C'est à cette question que tente de répondre le concept d'économie circulaire, qui, depuis plusieurs années, connaît un essor grandissant auprès des différents acteurs de la société. Une situation qui illustre particulièrement la complexité de cette problématique est la gestion du verre en fin de vie au Québec. Bien qu'étant une ressource potentiellement recyclable à l'infini, le verre issu de la collecte sélective du Québec peine à être recyclé. En effet, la qualité du flux de verre est trop basse pour être réutilisée via les circuits traditionnels. Il en résulte des centres de tri croulant sous les déchets de verre, incapable de trouver des débouchés économiques viables pour cette matière. Cependant, la découverte des propriétés pouzzolaniques du verre mixte finement broyé laisse entrevoir une possible réutilisation de ce verre comme remplacement partiel du ciment dans la fabrication du béton. A notre connaissance, la mise en lumière du bénéfice environnemental de cette réutilisation en boucle ouverte du verre n'a pas été démontrée. L'objectif de cette maîtrise est ainsi d'évaluer l'impact environnemental de la symbiose industrielle du verre recyclé en tant qu'ajout cimentaire à travers deux ouvrages, une dalle de trottoir ainsi qu'une passerelle piétonne en béton à ultra haute performance.

La quantification des impacts environnementaux a été effectuée à l'aide de la méthodologie d'analyse du cycle de vie, du logiciel SimaPro 8.3, de la base de données ecoinvent 3.2 ainsi que de la méthodologie d'évaluation des impacts IMPACT 2002+. Les résultats montrent que l'utilisation de la poudre de verre recyclé dans le béton, en tant qu'ajout cimentaire, réduit l'impact environnemental des bétons. Cette réduction est principalement due à la diminution de la teneur en ciment. Un élément qui apparaît comme le principal contributeur de l'impact environnemental du béton. Dans le cas des bétons à ultra haute performance les gains environnementaux ne sont visibles que si l'on prend en compte le gain en durabilité que confère l'utilisation d'ajout cimentaire pouzzolanique. L'analyse des deux études de cas présentée, permet de montrer les limites dans lesquelles l'utilisation du verre en boucle ouverte offre un débouché intéressant d'un point du cycle de vie environnemental.

**Mots-clés :** Analyse du cycle de vie, Économie circulaire, Boucle-ouverte, Recyclage, Gestion du verre, Fin de vie.

---

# ABSTRACT

How to enable better use of resources? It is to this question that the circular economy is addressing, concept which has been growing rapidly among the various actors of society for several years. A recent example that illustrates the complexity of this challenge is the management of glass waste in the province of Quebec. Although being a potentially endlessly recyclable resource, glass from Quebec's selective collection is struggling to be recycled. Indeed, the quality of the glass flow is too low to be reused via traditional outcomes. As a result sorting centers are crumbling under glass waste, unable to find viable economic opportunities for this material. However, with the pozzolanic properties of mixed glass finely ground, it can be a possible reuse of this glass as a partial replacement of cement in the manufacture of concrete. To the best of our knowledge, the environmental benefit of this open loop reuse of glass has not been studied. The objective of this master is to evaluate the environmental impact of the industrial symbiosis of recycled glass as a cement additive through two use studies, a sidewalk slab and an ultra-high performance concrete pedestrian bridge.

The quantification of environmental impacts was done using Life Cycle Assessment methodology, SimaPro 8.3 software, ecoinvent 3.2 database, and IMPACT 2002+ impact assessment methodology. The results show that the use of recycled glass powder in concrete as a cement additive reduces the environmental impact of concrete. This reduction is mainly due to the decrease in the cement content. An element that appears to be the main contributor to the environmental impact of concrete. In the case of ultra-high performance concretes the environmental gains are only visible if one considers the gain in durability due to the pozzolanic properties of glass powder. The analysis of the two case studies makes it possible to show the extent to which the use of open-loop glass offers an interesting outlet from a life cycle environmental point of view.

**Keywords:** Life cycle assessment, Circular Economy, Open-Loop, Recycling, Waste glass management, End of life.

# REMERCIEMENTS

Je souhaite, en premier lieu, remercier chaleureusement mes deux directeurs de recherche. Le professeur Ben AMOR qui m’a offert l’opportunité de venir effectuer un travail de recherche au Canada, et m’a accueilli dans son Laboratoire Interdisciplinaire de Recherche en Ingénierie Durable et Écoconception (LIRIDE). Je remercie aussi le professeur Arezki TAGNIT-HAMOU qui m’a fait découvrir la belle complexité technique du béton, et comprendre son intérêt comme matériau d’avenir. Je remercie également toute l’équipe du LIRIDE pour leur soutien autant technique que moral, particulièrement (et par ordre randomisé) Marianne, Miguel, Hessem, Bastien, Rizal, Sylvain, Davoud, Laurent, Jean Martin...

Je tiens ensuite à remercier les membres de ma famille proche, et tout particulièrement ma mère et mon père, restés en France, qui m’ont toujours soutenu malgré la distance qui nous séparait. Je remercie aussi mes colocataires, Pierre et Tomas, qui savent trouver les remèdes à l’ennui et aux doutes.

Enfin, je souhaite remercier ma conjointe Marine, pour tous ces moments passés ensemble et son soutien infailible.

# TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1. État de l’art .....	3
1.1. L’économie circulaire et le contexte du verre au Québec.....	3
1.2. Utilisation du verre dans le béton .....	8
1.3. L’ACV, outil holistique de l’évaluation de l’impact environnemental .....	10
1.4. Empreinte environnementale du béton .....	14
CHAPITRE 2. Objectifs de recherche .....	19
2.1. Objectif principal .....	19
2.2. Objectifs spécifiques.....	19
CHAPITRE 3. Article 1 : Is Open-loop recycling the lowest preference in a circular economy? Answering through LCA of glass powder in concrete.....	20
3.1. Avant-propos .....	20
3.2. Abstract.....	22
3.3. Introduction.....	23
3.4. Methodology .....	25
3.4.1. Goal and scope .....	26
3.4.2. Inventory .....	27
3.4.3. Life cycle impact method, software, and database.....	29
3.4.4. Interpretation .....	30
3.5. Results and discussions.....	32
3.5.1. Comparative results and contribution analysis.....	32
3.5.2. Sensitivity analysis.....	37
3.5.3. Monte Carlo analysis.....	39

3.6. Conclusions and perspectives .....	40
CHAPITRE 4. Article 2 : LCA case study of ultra-high performance concrete using glass powder as supplementary cementitious material .....	42
4.1. Avant-propos .....	42
4.2. Abstract.....	43
4.3. Introduction .....	44
4.4. Methodology.....	46
4.4.1. Goal and Scope definition.....	46
4.4.2. Inventory Analysis .....	47
4.4.3. Life cycle impact method.....	51
4.4.4. Interpretation.....	51
4.5. Results and discussion .....	52
4.5.1. Comparative LCA results .....	52
4.5.2. Sensitivity analysis.....	57
4.5.3. Uncertainty analysis.....	60
4.6. Conclusions and outlook .....	61
CHAPITRE 5. Conclusion .....	63
5.1. Sommaire et contributions.....	63
5.2. Travaux futurs.....	65
RÉFÉRENCES :.....	67
ANNEXE A : supplementary material: is open-loop recycling the lowest preference in a circular economy? Answering through lca of glass powder in concrete.....	75
ANNEXE B : supplementary material: LCA case study of ultra-high performance concrete using glass powder as supplementary cementitious material.....	82



# LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 Modélisation de l'économie circulaire [10] .....	4
Figure 1-2 Coût total de production de la poudre de verre (GP) selon le débit annuel de verre traité (TPY) en tonnes, considérant une durée de vie de 10 ans pour les équipements et 30 ans pour le capital foncier [PC : Ciment Portland et FA : Cendre Volante] [25] .....	8
Figure 1-3 Phases de l'ACV selon ISO 14040/44 [39], [40] .....	11
Figure 1-4 Schématisation des flux élémentaires échangés entre la technosphère et l'écosphère .....	13
Figure 1-5 Occurrence des termes <i>Life Cycle Assessment</i> , <i>Concrete</i> et <i>Cement</i> dans le titre, résumé ou mots clés des articles de la base de données ScienceDirect.....	15
Figure 3-1 . System boundaries of the sidewalk life cycle (T refers to transport) .....	27
Figure 3-2 Sidewalk design used for the case study (not to scale).....	28
Figure 3-3 Comparison of the midpoint results of the business as usual scenario (BAU Sc) and the glass powder scenario (GP Sc) using Impact 2002+ [Carcinogens (CA), Non-carcinogens (N-CA), Respiratory inorganics (RI), Ionizing radiation (IR), Ozone layer depletion (OLD), Respiratory organics (RO), Aquatic ecotoxicity (A-ECO), Terrestrial ecotoxicity (T-ECO), Terrestrial acidification and nitrification (T-ACI/NUT), Land occupation (LO), Aquatic acidification (A-ACI), Aquatic eutrophication (A-EUT), Global warming (GW), Non-renewable energy (NRE), Mineral extraction (ME)] .....	33
Figure 3-4 Comparison of the endpoint results of the business as usual scenario and the glass powder scenario using Impact 2002+ .....	36
Figure 3-5 Endpoint results of the BAU scenario and the GP scenario; GP concrete with distance suppliers (Sc.1), CG concrete with extended life span (Sc.2), GP concrete with particulate emissions (Sc.3), and GP concrete with subbase reuse (Sc.4) .....	38
Figure 3-6 Results on Impact 2002+ endpoint indicators of the Monte Carlo analysis (confidence interval: 0.95; 5,000 iterations) .....	40
Figure 4-1 Pedestrian bridge under study .....	47
Figure 4-2 System boundaries of concrete decks under study (T refers to transport).....	47
Figure 4-3 Midpoints results of conventional concrete (Conv. C.), Conv-UHPC and Glass-UHPC deck (IMPACT 2002+) [Aquatic acidification (A-ACI), aquatic eutrophication (A-	

EUT), aquatic ecotoxicity (A-ECO), land occupation (LO), terrestrial acidification/nutritification (T-ACI/NUT), terrestrial ecotoxicity (T-ECO), carcinogens (CA), non-carcinogens (N-CA), ionizing radiation (IR), ozone layer depletion (OLD), respiratory inorganics (RE-INO), respiratory organics (RE-O), mineral extraction (ME), non-renewable energy (NRE)].....	53
Figure 4-4 Endpoints results of conventional concrete (Conv. C), Conv-UHPC and Glass-UHPC decks (IMPACT 2002+).....	54
Figure 4-5 Midpoints results of conventional concrete, Conv-UHPC and Glass-UHPC decks (TRACI 2.1) .....	57
Figure 4-6 Results of the sensitivity analysis on lifespan of conventional concrete on endpoints indicators, Climate Change, Ecosystem Quality, Human Health, Resources [black points represent the original scenarios].....	59
Figure 4-7 Results on Impact 2002+ midpoint indicators of the Monte Carlo analysis between conventional concrete and Glass-UHPC (confidence interval: 0.95; 5000 iterations) .....	61
Figure A-1 Midpoint comparison between the production of 1kg of Portland cement and 1 kg of glass powder.....	80
Figure A-2 TRACI V2.1 midpoint results comparison between business as usual and glass powder scenarios .....	80
Figure A-3 Results on Impact 2002+ midpoint indicators of the Monte Carlo analysis (confidence interval = 0.95; iterations = 5000).....	81
Figure B-1 Midpoints results of Conv-UHPC, Glass-UHPC and conventional concrete (Conv. C.), decks for the same volume (IMPACT 2002+).....	83
Figure B-2 Endpoints results of Conv-UHPC, Glass-UHPC and conventional concrete (Conv. C.), decks for the same volume (IMPACT 2002+).....	83
Figure B-3 Characterisation factor distribution for Fossil fuel depletion (A) and Non-renewable energy (B).....	84
Figure B-4 Monte Carlo analysis on conventional concrete (A) and Glass-UHPC (B) on Impact 2002+ midpoint indicators (confidence interval: 0.95; 5000 iterations).....	85

# LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3-1 Concrete-ready mix design for both scenarios .....	28
Tableau 3-2 Proposed scenarios for the sensitivity analysis .....	31
Tableau 3-3 Major contributor and elementary flows for each midpoint indicator .....	34
Tableau 4-1 Mix design for the three concrete under study .....	48
Tableau 4-2 Characteristics of the three pedestrian deck types.....	50
Tableau 4-3 Life span scenarios of the three concrete mix designs under study (in years) .....	52
Tableau 4-4 Main contributors of midpoints potential environmental categories (IMPACT 2002+) of Conv-UHPC, Glass-UHPC and Conventional Concrete for the material phase [Aquatic acidification (A-ACI), aquatic eutrophication (A-EUT), aquatic ecotoxicity (A-ECO), land occupation (LO), terrestrial acidification/nutritification (T-ACI/NUT), terrestrial ecotoxicity (T-ECO), carcinogens (CA), non-carcinogens (N-CA), ionizing radiation (IR), ozone layer depletion (OLD), respiratory inorganics (RE-INO), respiratory organics (RE-O), mineral extraction (ME), non-renewable energy (NRE)] .....	56
Tableau A-1 Inventory of the reference and glass powder concretes, for 1m <sup>3</sup> of concrete.....	76
Tableau A-2 Inventory of the construction process for one functional unit.....	77
Tableau A-3 Inventory of 1m <sup>2</sup> of soil compacting process .....	77
Tableau A-4 Inventory of 1m <sup>2</sup> of geotextile.....	77
Tableau A-5 Transportation distances of materials and datasets used .....	77
Tableau A-6 Inventory of the glass powder production process (values remain confidential) ..	78
Tableau A-7 Physical properties differences between reference and glass powder containing concrete used for the sidewalk construction.....	78
Tableau A-8 Midpoints and endpoints results of the life cycle assessment for each scenario (IMPACT 2002+) .....	79
Tableau A-9 Contribution of midpoint indicators to endpoints indicators (IMPACT 2002+)..	79
Tableau B-1 Midpoints and Endpoints impact categories of IMPACT 2002+ .....	82



# INTRODUCTION

L'économie circulaire est un concept très populaire auprès des différents acteurs scientifiques, économiques, politiques et citoyens. Faisant le constat de la dégradation environnementale qui accompagne le mode de développement économique actuel, son objectif est de permettre une meilleure utilisation des ressources en optimisant le cycle de vie des matières au travers de boucles de consommation. Ce concept est à la base de nombreuses innovations dans le secteur de la gestion des matières résiduelles et du changement de paradigme qui consiste à les voir comme source de matières premières, et non plus comme des déchets. Ainsi, la symbiose industrielle, qui se définit lorsque le déchet d'une industrie peut servir de matière première à une autre, est un des principes de l'économie circulaire, aussi connu sous le nom de boucle ouverte, en opposition à la boucle fermée lorsque la matière est réutilisée dans la même industrie [1]. Une bonne illustration de ce concept est l'utilisation du verre mixte issu du recyclage qui pourrait être utilisé en tant qu'ajout cimentaire dans le béton. Au Québec, malgré un taux de récupération du verre important, il est difficile de lui trouver des débouchés économiquement viables. En effet, le verre mixte est composé d'un mélange de verre de différents types (vert, transparent, marron) ainsi que de petites impuretés (papiers, bouts métalliques, cartons...) [2]. Ces caractéristiques le rendent impropre à une réutilisation dans les circuits de récupérations traditionnels, car elles ne permettent pas de passer les exigences de qualités requises. Ainsi, la plupart du verre récupéré au Québec finit sa course dans les décharges. Cependant, la découverte des propriétés pouzzolaniques du verre mixte finement broyé apparaît comme une opportunité de conversion dans le béton [3]. La question se pose donc de savoir si l'utilisation du verre mixte recyclé en tant qu'ajout cimentaire dans le béton présente un réel intérêt environnemental dans une perspective d'économie circulaire.

Le présent mémoire aborde une utilisation particulière d'un concept inhérent à l'économie circulaire, la boucle ouverte (ou symbiose industrielle), dans le cas de l'utilisation de verre recyclé en tant qu'ajout cimentaire. Le chapitre premier développe le contexte dans lequel la recherche s'inscrit, c'est-à-dire l'avènement de l'économie circulaire et de ces principes. Puis, nous nous intéresserons au cas illustrant bien les limites et défis de l'économie

circulaire, l'état de la gestion du verre recyclé au Québec. Ensuite, nous ferons l'emphase sur l'intérêt que porte l'utilisation de verre issue du recyclage dans l'industrie du béton. Nous détaillerons ensuite la méthodologie employée pour analyser l'empreinte environnementale d'un produit ou d'un service d'un point de vue holistique, l'analyse du cycle de vie. Enfin, nous nous arrêterons sur l'état de l'art de l'utilisation de cette méthodologie dans le cas du béton, tout en abordant les différentes limites scientifiques des récents travaux. Le deuxième chapitre est consacré à la définition des objectifs de la recherche, ainsi que des sous objectifs qui y sont associés. Le troisième et le quatrième chapitre présentent les deux articles permettant de répondre à ces objectifs. Le cinquième chapitre résume l'ensemble des résultats des deux articles, suivi d'une conclusion générale et d'une ouverture sur les travaux futurs.

# CHAPITRE 1. ÉTAT DE L'ART

## 1.1. L'économie circulaire et le contexte du verre au Québec

Depuis les années 1970, l'humanité est en dépassement par rapport à l'équilibre entre ce qu'elle demande à la planète Terre (en terme d'extraction de ressources) et ce que cette dernière est capable de régénérer par an [4]. Avec les demandes actuelles, il est considéré qu'il faudrait l'équivalent de 1,7 planète à l'humanité afin de retrouver cet équilibre. Ce chiffre grandit dans l'hypothèse où l'ensemble de la population se rapproche des habitudes de consommations des citoyens de pays dits développés, comme les États-Unis, le Canada ou les pays d'Europe. Une tendance qui est d'ailleurs à prévoir si l'on en croit les prévisions de l'OCDE concernant l'augmentation des classes moyennes dans le monde [5].

Il est alors évident d'affirmer que la trajectoire de développement sur laquelle est positionnée l'espèce humaine n'est pas durable, et constitue un risque sur le long terme en transformant de manière irréversible l'environnement propice à son propre développement. C'est ce constat que l'on retrouve dans les textes fondateurs du mouvement écologiste moderne, comme le rapport du club de Rome, *the Limits to Growth* [6], l'essai d'Ernst F. Schumacher *Small is Beautiful* [7] ou encore le rapport Brundtland [8], qui posaient les bases du développement durable.

De cette nécessité de penser des modèles de développement durable ont émergé différents concepts depuis les années 80, dont le but est de minimiser l'utilisation des ressources et d'optimiser l'ensemble des ressources déjà extraites, afin de s'éloigner de la logique linéaire consistant à extraire, transformer, consommer puis jeter. L'économie circulaire est l'une d'entre elle et suscite depuis 2010 un intérêt grandissant au sein des différentes sphères de la communauté scientifique, économique, politique et citoyenne. Une partie de cet essor est en grande partie due à la fondation créée par la navigatrice Ellen MacArthur (la fondation Ellen MacArthur), qui a largement contribué à la popularisation du concept d'économie circulaire [9].

Selon la fondation, l'économie circulaire est un système industriel basé sur la mise en place de cycles de production et de consommation en boucle, qui sont découplés au maximum

de l'extraction de ressources non-renouvelables. Le modèle distingue deux cycles, celui des nutriments techniques (les objets, les matériaux non-organiques...) et celui des nutriments biologiques (les aliments, les produits organiques comme le bois ou le coton...). Les nutriments biologiques sont consommés et retournés à l'environnement sous forme de compost ou de digestion anaérobie, afin de permettre la régénération des ressources renouvelables. La circularité des nutriments techniques doit être assurée par une consommation collégiale et collaborative des biens, une optimisation de leur durée de vie au travers leur réparabilité et leur reconditionnement, ainsi qu'un système de recyclage efficace en fin de vie [10]. C'est ce modèle circulaire de production et de consommation qui est illustré dans la Figure 1-1, et qui a pour but de découpler la croissance économique de la destruction environnementale.

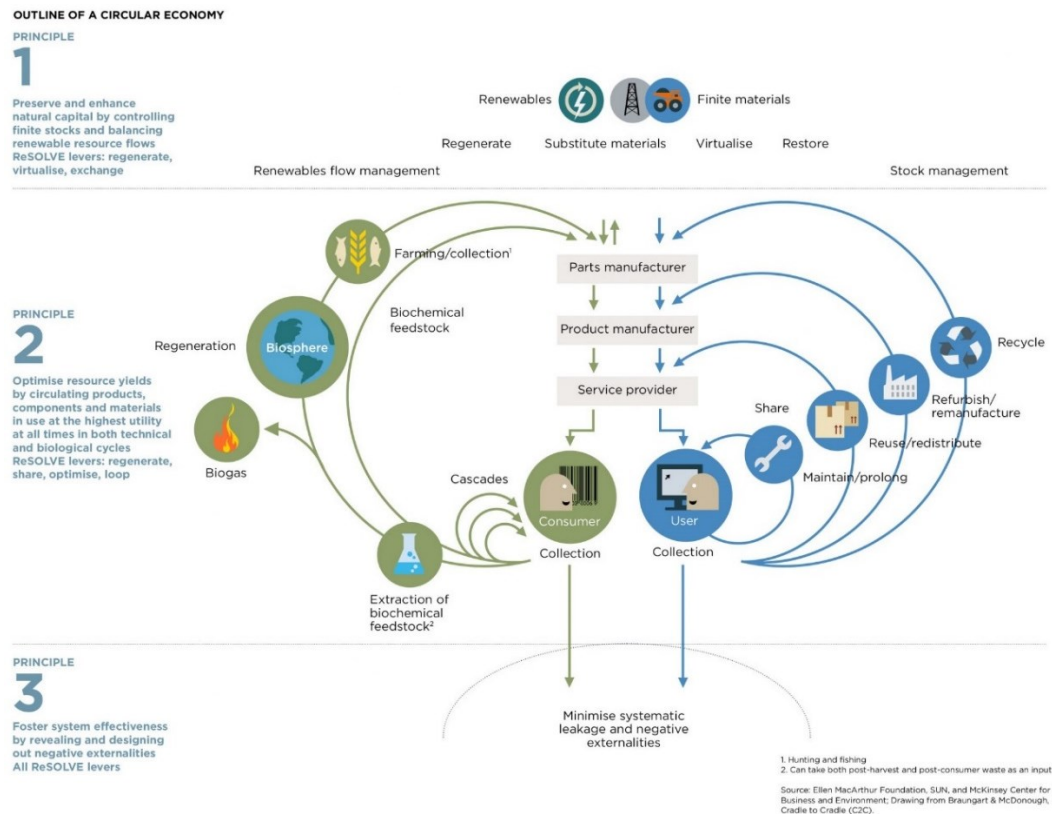


Figure 1-1 Modélisation de l'économie circulaire [10]

L'élan actuel que connaît ce concept est notamment dû au fait qu'il apparaît comme un modèle cohérent et réaliste, qui s'appuie sur plusieurs écoles de pensées écologistes telles



que l'économie de la performance, l'économie régénérative, le *craddle to craddle* (du berceau au berceau), l'écologie industrielle ou le biomimétisme. Ainsi, de nombreuses politiques publiques se mettent en place en intégrant les principes de l'économie circulaire. La Chine a été le premier pays du monde à voter son intégration dans sa stratégie de développement dès 2002, puis à la promulguer dans une loi en 2009. Une mise en place largement motivée par les préoccupations autour des modes de production, des pollutions, et d'utilisation de l'eau et des espaces [11]. Plus sensible aux problématiques autour de la raréfaction des ressources (et de leurs prix) ainsi qu'aux possibles gains en terme de compétitivité [11], l'Europe propose depuis 2015 un plan d'action pour l'implémentation de l'économie circulaire appelé *Closing the loop – An EU action plan for the Circular Economy* [12]. Au Québec, la mise en œuvre d'une approche basée sur l'économie circulaire se retrouve dans sa politique de gestion des matières résiduelles, qui a pour objectif fondamental que la seule matière résiduelle éliminée au Québec, soit le résidu ultime. Cette politique se développe au travers de trois enjeux, la limitation du gaspillage des ressources, la contribution à l'atteinte des objectifs du plan d'action sur les changements climatiques, et la responsabilisation de l'ensemble des acteurs concernés par la gestion des matières résiduelles [13]. Il est en effet intéressant de constater que la gestion des matières résiduelles est le secteur pivot d'une transition vers une économie plus circulaire. En effet, une meilleure gestion de ces dernières permettrait leur meilleure réinjection dans le système de production/consommation des ressources. Ce recyclage peut s'effectuer de plusieurs manières, soit en boucle fermée, soit en boucle ouverte.

La boucle fermée signifie que la matière recyclée peut être réutilisée pour la même utilisation. Le but est de minimiser la perte de valeur du produit. Les propriétés des matériaux recyclés sont ainsi considérées similaires à celui du matériau vierge. Par exemple, les canettes en aluminium sont réutilisées pour faire des produits en aluminium, et les bouteilles en verres sont réutilisées pour faire du verre, etc... En boucle ouverte, les propriétés du produit recyclé sont différentes de celui du produit vierge. Ce produit est alors recyclé dans une autre filière [14]. Cet écart de propriété est, dans la grande majorité des cas du à une détérioration irréversible de la matière qui est alors utilisée en remplacement d'un matériau de qualité inférieure. C'est par exemple le cas du plastique qui peut être utilisé comme matériau de drainage [15].

Un cas qui illustre bien la complexité propre à cette problématique est la gestion du verre au Québec. Dans cette région, le verre est principalement collecté auprès des particuliers via un bac de collecte sélective. Ce bac permet la récupération d'un mélange de matières recyclables parmi lesquelles différents type de verres, plastiques, papiers, cartons et métaux [16]. Les matières récoltées dans ce bac sont ensuite collectées par des camions spécialisés, et acheminées vers les centres de tri où elles seront séparées par matière puis conditionnées en ballots afin d'être revendues [17]. Dans le cas du verre issu du recyclage, le secteur est en crise depuis 2013 avec la fermeture de la principale usine de décontamination du verre Klareco, qui traitait la majorité du verre issu du recyclage du Québec. La principale raison de cette fermeture est reliée aux coûts trop élevés de traitement du verre issu des centres de tri ainsi qu'au manque de débouchés. En effet, le système de collection pêle-mêle des matières recyclables ne faisant, par définition, pas de distinctions entre les types de verre et les autres matières recyclables (papier, cartons, plastiques...), il en résulte un flux qu'il est difficile de séparer correctement. Le flux de verre sortant des centres de tri est alors de très basse qualité, fortement contaminé par les autres matières, et mélangeant des verres de différents types. La valeur économique de ce verre mixte est d'ailleurs négative. En 2016, les centres de tri devaient payer 28\$ par tonne pour s'en débarrasser [18]. Afin de « refermer la boucle » et d'être réutilisé pour fabriquer du verre, ce flux doit de nouveau être trié par couleur, et séparé des impuretés qui risquent d'endommager les machines de production et diminuer la qualité du verre produit. Un processus lourd et coûteux, qui ne semble pas être économiquement viable, comme l'illustre la fermeture de l'usine Klareco. Désormais, le verre est majoritairement envoyé dans les lieux d'enfouissement techniques pour y être entreposé. Il y est parfois utilisé comme matériau de recouvrement des chemins d'accès, car il est peu coûteux, disponible en grande quantité, et suffisant pour remplacer les graviers de recouvrement. C'est une illustration du *down-cycling*, ou recyclage par le bas, dans laquelle, ayant perdu sa qualité, le verre remplace un matériau de très faible valeur ajoutée. En 2015, malgré plus de 150 000 tonnes de verre récupérées au Québec par les centres de tri issue de la collecte sélective, seulement 23 000 tonnes ont été revendues. C'est une réduction de 57% par rapport à 2012 [19]. En plus de la récupération dans les bacs pêle-mêle, le recyclage du verre au Québec peut aussi s'effectuer via un système de consigne des contenants à usage uniques (principalement des bouteilles de bières ou de

boissons gazeuses). Ce système de collecte a permis en 2015 la récupération de 24 000 tonnes (soit un taux de récupération de 73%) [19]. Ainsi, dans une étude auprès des centres de tri (44,4% de répondant), le traitement et la vente du verre sont identifiés comme étant le plus gros problème que vivent actuellement les centres de tri au Québec [17]. Un problème qui est par ailleurs illustré dans la presse, où des articles questionnant à juste titre ce gâchis de matières recyclables sont régulièrement publiés [20]–[24].

L'état actuel du système de gestion des matières recyclables au Québec ne permet pas la réutilisation du verre dans un système de boucle fermée. Cela conduit à l'accumulation du verre mixte dans les centres de tri et les centres d'enfouissement technique, un flux de faible qualité difficile à valoriser car il contient un mélange de verre de différentes couleurs. Dès lors, il devient nécessaire de trouver des débouchés économiques viables pour le recyclage du verre mixte. Son utilisation en tant qu'ajout cimentaire dans le béton, c'est à dire comme remplacement partiel d'une partie du ciment, est depuis quelques années investiguée sérieusement [3]. Dans une récente étude, Tucker et ses collègues étudient la viabilité économique que porte le recyclage du verre comme ajout cimentaire [25] dans un contexte nord-américain. Les auteurs démontrent ainsi que le coût de production de la poudre de verre pouzzolanique décroît lorsque le débit de verre ainsi traité augmente. Cela devient particulièrement intéressant lorsque ce coût de production devient inférieur à celui du ciment, pour un débit de 20 000 tonnes par année, ou bien de la cendre volante de classe F, une autre pouzzolane, pour un débit de plus de 50 000 tonnes par année (cf. Figure 1-2). Des quantités qui pourraient être rapidement atteignables au Québec, avec un tonnage de récupération de verre de 150 000 tonnes en 2015.

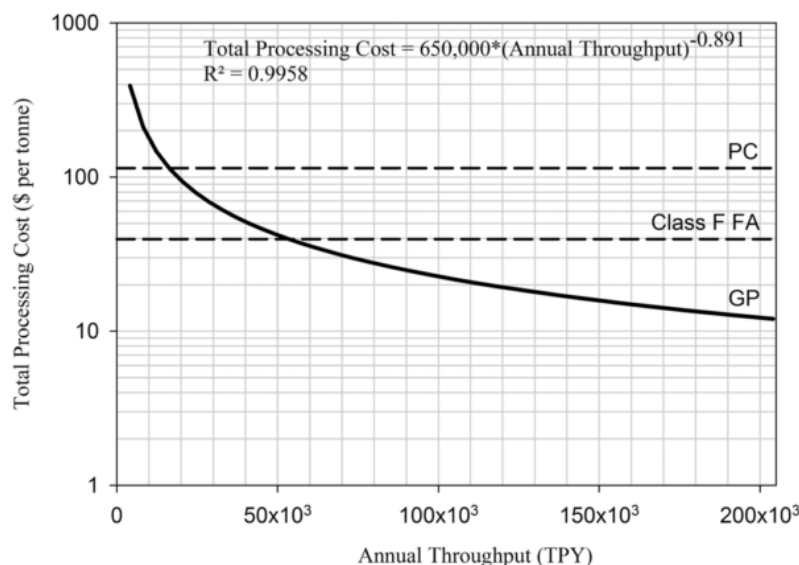


Figure 1-2 Coût total de production de la poudre de verre (GP) selon le débit annuel de verre traité (TPY) en tonnes, considérant une durée de vie de 10 ans pour les équipements et 30 ans pour le capital foncier [PC : Ciment Portland et FA : Cendre Volante] [25]

## 1.2. Utilisation du verre dans le béton

Dans ce chapitre, nous allons expliciter l'intérêt que peut avoir l'utilisation de verre recyclé dans le béton, en termes de propriétés mécaniques.

Historiquement, le béton a souvent été le véhicule du recyclage de nombreux matériaux. En effet, le béton requiert des éléments dont la principale fonction est de « remplir l'espace » (*filler* en anglais). Il n'est alors pas rare de trouver des cas où certains éléments du béton sont ainsi substitués par d'autres matériaux encombrants (aussi bien physiquement que du point de vue de la gestion des matières résiduelles). C'est, par exemple, le cas des déchets de chantiers, comme le béton lui-même pouvant être démantelé et utilisé comme agrégats [26]. Mais aussi de certains déchets plastiques, pouvant être utilisés comme granulats plus ou moins fins ou comme matériaux fibreux [27], [28].

Il en va de même avec le verre mixte issu du recyclage, qui, dans un premier temps, fut considéré comme une alternative aux agrégats. Ainsi, dans les années 70, l'utilisation du verre mixte dans le béton en tant qu'agrégats est expérimentée. Les résultats sont très peu satisfaisants. En effet, les échantillons ainsi fabriqués présentent de mauvaises performances mécaniques, des dégradations en surface et une expansion excessive en

comparaison de béton avec des agrégats conventionnels de même taille [29]. Ces mauvaises performances sont largement dues à une réaction indésirable, endogène du béton, et découverte dans les années 40 aux États Unis : la réaction alkali-granulat, aussi appelé RAG ou *alkal-silica reaction (ASR)* en anglais [30]. Cette réaction est visible extérieurement par des fissures, ainsi que des déformations irréversibles dans la structure affaiblissant par la même les propriétés mécaniques et la durée de vie des ouvrages. Comme son nom l'indique, ce phénomène est le résultat de la réaction chimique entre les silices réactives des agrégats de verre et les ions hydroxydes de la solution interstitielle du béton. Les produits de ces réactions induisent des pressions dans la structure matricielle, résultant en des fissurations microscopiques [31]. Cette déconvenue a contribué à freiner le recyclage du verre dans le béton afin d'éviter les faiblesses à long terme sur les structures. Cependant, cette idée reprit de l'intérêt alors que progressaient les connaissances sur la RAG. En effet, dans une étude de 2000, Weihua Jin et ses collègues montrent que si les particules de verre sont broyées suffisamment finement (une taille inférieure à 300  $\mu\text{m}$ ), les mortiers ne présentent pas de signes de la réaction alkali-granulat [32]. Yixin Shao et ses collègues notent même que la poudre de verre (issue du recyclage de lampes fluorescentes), dont la taille des particules est inférieure à 38  $\mu\text{m}$ , présentent des propriétés pouzzolaniques [33]. C'est-à-dire que les particules de verre réagissent avec les produits de l'hydratation du ciment, produisant des hydrates qui renforcent les performances mécaniques des bétons. Au contact de l'eau, les particules de ciment produisent du silicate de calcium hydraté, responsable de la dureté du ciment (conventionnellement appelé C-S-H), ainsi que de la portlandite (ou chaux éteinte). Cette dernière, en présence d'eau, réagit avec les matériaux pouzzolaniques pour créer encore plus de liant C-S-H, renforçant par la même les propriétés mécaniques du béton. Historiquement, ce sont les cendres volcaniques issues de la région de la ville de Pouzzoles (en Italie) qui ont été utilisées ainsi, donnant depuis ce nom aux matériaux aux propriétés similaires. De nombreuses expérimentations ont alors depuis été conduites, validant les propriétés pouzzolaniques du verre finement broyé et les gains en durabilité induits dans les bétons [34]–[37].

Maintenant que l'ensemble des applications du verre dans le béton, leurs avantages et limitations ont été explicités, il convient d'introduire la méthodologie avec laquelle l'évaluation de l'impact environnemental est possible, l'analyse du cycle de vie.

### 1.3. L'ACV, outil holistique de l'évaluation de l'impact environnemental

Devant l'état des ressources et de la dégradation environnementale, le constat se pose de devoir prendre les « bonnes » décisions quant à la mise en place d'un développement durable. L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) est un outil permettant d'évaluer l'impact environnemental potentiel d'un produit ou d'un service d'un point de vue holistique. Cette approche permet d'analyser et d'identifier les contributeurs les plus importants (aussi appelés points chauds), sur l'ensemble du cycle de vie du produit (extraction des matières premières, production, transport, utilisation, fin de vie), ainsi qu'au regard de plusieurs problématiques environnementales (changement climatique, eutrophisation, destruction de la couche d'ozone...) [38]. Cette quantification globale de l'empreinte environnementale permet d'éclairer le volet environnemental de produits ou de services tout en évitant les transferts de pollution d'une étape à une autre, ou bien d'un problème environnemental à une autre. Il devient alors possible d'étudier l'empreinte environnementale d'un produit, afin d'identifier les éléments les plus impactants, ou bien de comparer la contribution environnementale de deux systèmes ayant une fonction équivalente. L'ACV peut être utilisé pour plusieurs fins. Il peut s'agir, lors de la phase de conception, de minimiser l'impact environnemental du système (on parle alors d'écoconception), de communiquer sur la performance environnementale (par exemple en vue d'une certification), ou bien dans le processus de choix et d'évaluation de politique publique.

D'après les normes ISO 14040 [39], la réalisation d'une analyse du cycle de vie contient quatre phases distinctes obligatoires : la définition des objectifs et du champ d'étude, l'inventaire des émissions et des extractions, l'analyse d'impact et l'interprétation (cf. Figure 1-3). Les flèches à double sens entre chaque étape illustrent le caractère itératif de l'ACV. En effet, une ACV est souvent le résultat d'un affinement constant du champ

d'étude ou de l'inventaire, au fil de l'identification des principaux contributeurs lors des résultats préliminaires.

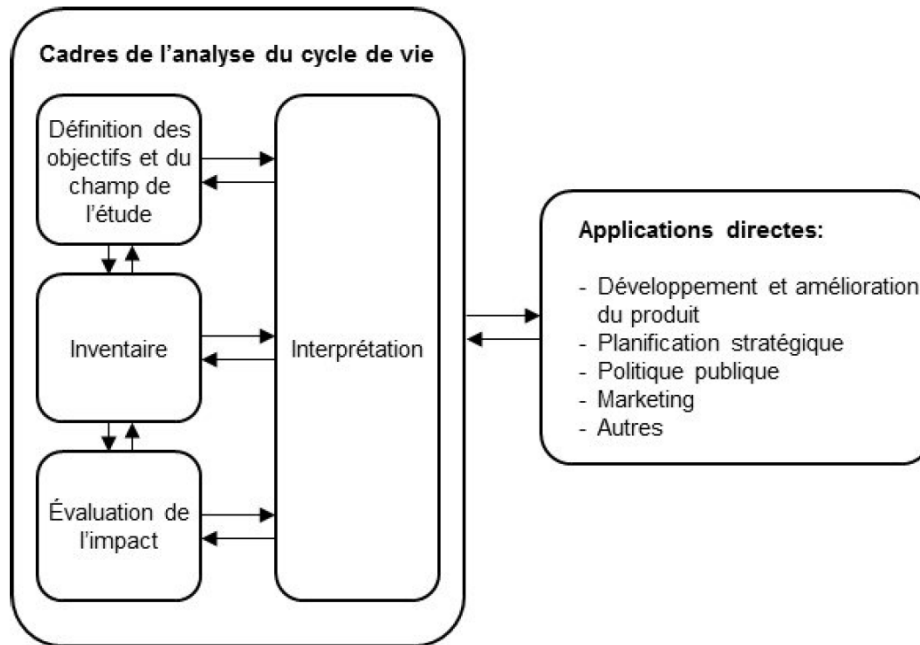


Figure 1-3 Phases de l'ACV selon ISO 14040/44 [39], [40]

Tout d'abord, la première phase est la définition des objectifs et du champ d'étude. C'est durant cette étape purement descriptive que l'ensemble des objectifs de l'étude, ainsi que le cadre dans lequel elle s'inscrit, sont définis. Cette phase permet de déterminer clairement le système à l'étude en définissant un ensemble d'éléments cruciaux. Tout d'abord, les objectifs de l'étude doivent être fixés. Ils explicitent la raison de l'ACV, son public, ainsi que son application. Ensuite, la définition du champ d'étude établit explicitement différents éléments caractérisant le système à l'étude avec suffisamment de profondeur et de détails pour répondre aux objectifs définis. Parmi ces éléments, on peut citer les suivants :

- la fonction du système étudié : elle sert de base aux définitions de l'unité fonctionnelle et des frontières du système. Le but est de réfléchir non pas en termes de produits ou d'objets, mais en qualité de service rendu par ce produit. Cette notion permet de comparer sur une base commune.

- l'unité fonctionnelle : elle consiste en une phrase qui quantifie le service rendu dont on souhaite évaluer les impacts. Cette quantification permet de mettre à l'échelle les différents flux de matières et d'énergies lors de la modélisation du système à l'étude, afin d'en assurer la cohérence.
- les frontières du système : idéalement, l'ACV a pour but de prendre en compte l'ensemble des étapes du cycle de vie. C'est-à-dire du berceau au tombeau, en commençant par l'extraction des matières premières, les processus de raffinement et de fabrication, les phases de transports, l'utilisation, ainsi que la fin de vie. Cependant ces études peuvent parfois être limitées à certaines étapes. On parle, par exemple, de berceau à la porte lorsque l'on ne prend pas en compte les étapes à la sortie de l'usine de fabrication. Ces choix peuvent, par exemple, être motivés par la position du commanditaire de l'étude dans la chaîne de fabrication.
- les règles d'affectation/attribution : dans les cas de coproduits issues d'une même chaîne de fabrication, il est nécessaire d'explicitier la manière dont l'impact environnemental est réparti entre chaque coproduit.
- la méthodologie d'évaluation des impacts : elle permet de traduire l'ensemble des flux de matières échangées avec l'environnement en impacts environnementaux.
- les scénarios alternatifs : la définition de scénarios alternatifs permet de tester la sensibilité de l'interprétation à différents paramètres (différents moyens de transport, différents fournisseurs...).
- les hypothèses, les exigences sur la qualité des données, les limitations.

Une fois cette première étape de définition des objectifs et du champ d'étude effectuée, il faut effectuer l'inventaire des émissions et des extractions. C'est l'étape clé de l'ACV. Elle consiste à quantifier l'ensemble des échanges effectués entre le système et l'environnement. Ces échanges sont désignés en ACV par le terme « flux élémentaires ». Ils représentent flux qui sont :

- soit émis dans l'environnement dans l'eau, l'air ou le sol. C'est le cas, par exemple, des gaz à effet de serre.
- soit retirés à l'environnement, comme c'est le cas des minerais ou du pétrole brut.



La Figure 1-4 représente une vision schématisée du monde, au sens de l'ACV. Le concept est le suivant : l'ensemble des activités humaines, la techno-sphère, contient, entre autres, le système sous étude et échange avec l'environnement, représenté ici par l'écosphère, qui nous fournit les matières premières et dans lesquelles nous rejetons des polluants. Le but de l'inventaire est de répertorier l'intégralité de ces échanges. Afin de réaliser l'inventaire holistique des émissions et des extractions, il est donc nécessaire de connaître l'ensemble ces propres émissions/extractions, ainsi que celle de ces fournisseurs, mais aussi des fournisseurs de ces fournisseurs, et ainsi de suite. Afin de simplifier cette tâche, il est possible d'utiliser des bases de données spécialisées, fournissant l'ensemble des émissions/extractions propre à un processus donné [41]. A titre d'exemple, ces bases de données peuvent fournir les émissions et extractions propres à la fabrication d'1 kg d'acier, à la production d'1 kWh d'électricité au Québec, ou au transport par camion d'1kg de matière sur 1km. La réalisation de l'inventaire du cycle de vie va consister à réaliser un modèle du cycle de vie du produit ou service à l'étude, dans un logiciel spécialisé permettant de relier les processus des bases de données aux informations collectées de flux de matières et d'énergies du système.

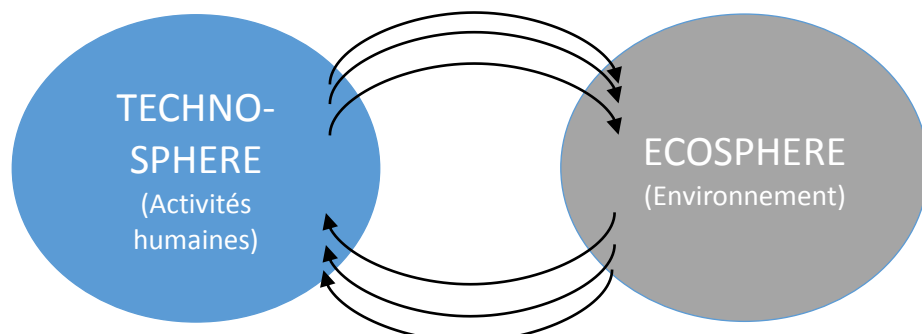


Figure 1-4 Schématisation des flux élémentaires échangés entre la technosphère et l'écosphère

Une fois les données d'inventaires réunies, il est légitime de se demander comment en faire l'interprétation. En effet, il est alors difficile d'analyser l'ensemble des données d'inventaire, car il ne représente que des quantités de produit X ou Y émis ou soustraits de l'écosphère, sans que l'on puisse en connaître l'effet positif ou négatif, important ou faible, sur l'environnement. Le but de la phase de l'évaluation de l'impact est la traduction de cet inventaire en impacts environnementaux. Pour ce faire, chaque flux élémentaire est tout

d'abord classifié. C'est-à-dire que l'on assigne à chaque flux élémentaire une (ou plusieurs) catégorie d'impact auquel il contribue. Ensuite, le flux élémentaire est caractérisé. C'est-à-dire que l'on évalue l'importance de sa contribution à la catégorie d'impact. Cette étape est généralement effectuée en référence à un flux élémentaire servant d'étalon de mesure. Ainsi, pour le changement climatique, lié aux émissions des gaz à effet de serre, l'unité de mesure est définie en kilogramme de CO<sub>2</sub> équivalent, et tous les gaz à effet de serre sont rapportés à cette mesure. A titre d'exemple, le kilogramme de CO<sub>2</sub> émis dans l'atmosphère équivaut alors 1kg de CO<sub>2</sub>eq, tandis que le kilogramme de méthane correspond à 25kg de CO<sub>2</sub>eq. Cette étape est effectuée à l'aide de modèle d'évaluation de l'impact environnemental, comme le modèle IMPACT 2002+.

L'étape finale de l'ACV est l'interprétation. Une fois les impacts environnementaux évalués, il convient d'en faire une analyse et d'en tirer des conclusions. La première étape est l'identification des procédés les plus contributeurs et les raisons de leurs tributs aux différents impacts environnementaux. Idéalement, cette analyse doit être accompagnée d'une série de contrôles, permettant d'évaluer la qualité et la robustesse des conclusions. Ces contrôles peuvent prendre la forme d'analyse de sensibilité, grâce à des scénarios alternatifs, ou bien des analyses permettant de voir la propagation des incertitudes dans les résultats finaux. L'objectif de l'interprétation est d'en dégager des recommandations claires quant aux priorités d'actions à effectuer, afin de réduire l'impact environnemental du système étudié.

## 1.4. Empreinte environnementale du béton

Devant l'intérêt grandissant porté sur le développement durable et les problématiques environnementales, la demande pour des matériaux plus écologiques connaît une forte augmentation. Le béton n'échappe pas à cette tendance. La facilité de fabrication du béton, la relative abondance sur tout le globe de ses principaux composants ainsi que sa grande diversité de mise en forme et d'application, en font le matériau de construction le plus utilisé à travers le monde. Il est en effet estimé que la consommation mondiale annuelle avoisine les 25 gigatonnes, c'est-à-dire plus de 3,5 tonnes de béton par personne par année [42]. Une production qui devrait continuer à s'élever dans les prochaines années, entretenue par l'augmentation de la population mondiale et de leurs besoins. Cette quantité

gigantesque a pour conséquences inévitables d'importantes pollutions locales comme globales. Notamment à l'issue de la production du ciment, élément clé dans la fabrication du béton. Il est en effet considéré qu'à elle seule, l'industrie du ciment est responsable de l'émission de 5 à 7 % des émissions humaines de CO<sub>2</sub> [43], ainsi que de 12 à 15% de la consommation d'énergie dans le secteur industriel [44].

L'empreinte environnementale du béton est relativement bien documentée. Ceci notamment grâce à l'avènement de la méthodologie d'ACV qui s'est imposée comme étant l'outil privilégié pour analyser le volet environnemental des différents matériaux de construction [45]. Il en résulte, depuis quelques années, une multitude d'ACV sur les bétons, comme l'illustre la Figure 1-5.

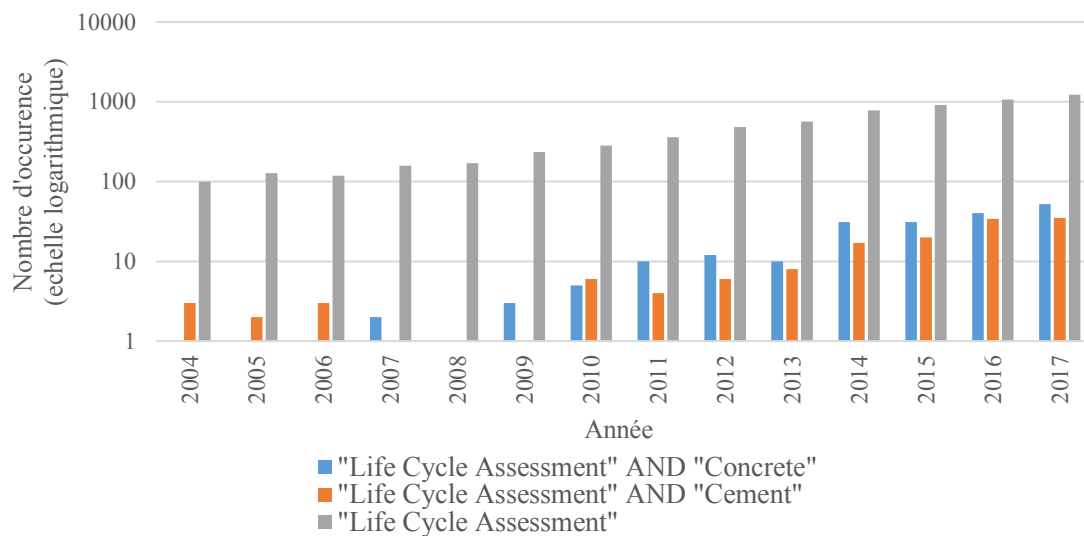


Figure 1-5 Occurrence des termes *Life Cycle Assessment*, *Concrete* et *Cement* dans le titre, résumé ou mots clés des articles de la base de données ScienceDirect

Cependant, à notre connaissance, une seule étude d'ACV porte sur l'utilisation de verre comme ajout cimentaire [46]. Cette étude compare les émissions de GES, la demande énergétique cumulée, l'empreinte eau et la « toxicité environnementale » (un ensemble de plusieurs indicateurs environnementaux) de trois bétons. L'un est un béton conventionnel, les deux autres comprennent de la poudre de verre recyclé ou du laitier de haut fourneau alkali-activé en tant qu'ajout cimentaire. L'ACV est effectuée du berceau à la porte de l'usine de fabrication, et se base sur la production d'1m<sup>3</sup> de béton répondant à des

résistances en compression à 28 jours similaires (35 MPa). Les résultats de l'analyse sont assez nets : le béton avec poudre de verre est moins impactant que le béton conventionnel, avec 19% de moins sur les GES, 17% moins d'énergie, 14% de moins d'eau, et 14 à 21% de moins sur les autres indicateurs environnementaux. L'impact environnemental de ces deux bétons est très largement dominé par la production du ciment, qui représente plus de 80% des impacts pour toutes les catégories. Les auteurs remarquent, cependant, l'incertitude élevée des résultats, pouvant inverser les conclusions de l'étude.

La fabrication du ciment étant particulièrement énergivore, elle est assez largement couverte par diverses ACV [43], [47], [48]. Les études couvrent particulièrement les émissions de GES, et notamment de CO<sub>2</sub>. Il est estimé qu'une quantité entre 0,7 et 1,1 tonne de CO<sub>2</sub> est émise pour la production de chaque tonne de ciment [43], [49], [50]. Une partie de ces émissions, est attribuée à la réaction de décarbonation du calcaire (CaCO<sub>3</sub>) dans les fours des cimenteries, en oxyde de calcium (CaO) et en dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). L'autre partie des émissions de CO<sub>2</sub> est due à la production d'énergie. Dans cette dernière on distingue les émissions directes et indirectes. Les émissions directes étant la résultante des émissions liées à la combustion des différents carburants, afin de porter la température des fourneaux aux environs de 1500 °C [51]. Les émissions indirectes étant les émissions liées à la production de l'électricité nécessaire au fonctionnement de la cimenterie. Une revue de la littérature réalisée par P. Van den Heede et N. De Belie [43], révèle que les émissions de CO<sub>2</sub> dues à la réaction de décarbonation représentent de 46 à 63% des émissions totales de CO<sub>2</sub>. Les émissions directes et indirectes représentent, quant à elles, environ 35-50% et 0-10% des émissions totales de CO<sub>2</sub>, respectivement. Ces variations sont attribuables aux disparités technologiques et géographiques, ainsi qu'au type de carburant utilisé. En effet, un four à ciment rotatif moderne émet environ deux fois moins d'émissions directes qu'un four vieillissant [50]. Concernant les autres gaz à effet de serre comme le méthane (CH<sub>4</sub>) ou le protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O), bien qu'ayant un indice de réchauffement global à 100 ans plus élevé (respectivement 28 et 298) que le CO<sub>2</sub>, ils ne représentent qu'une infime partie des contributions au changement climatique, de l'ordre de 0 à 1,2% [48].

Cependant, les GES ne sont pas les seules pollutions émises lors de la fabrication du ciment. En effet, la combustion des combustibles fossiles dans les fours produit des émissions d'oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ), de dioxyde de soufre ( $\text{SO}_2$ ), des particules fines et des métaux lourds [52]. Ces émissions vont contribuer par exemple au phénomène d'acidification ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ) et d'eutrophisation ( $\text{NO}_x$ ), ainsi qu'à des problèmes de santé humaine.

Dans une revue de littérature des émissions des cimenteries françaises, C. Chen et ses collègues notent une grande variabilité autour des quantités de polluants émis, selon les études, notamment pour les polluants autre que les GES [53]. Les auteurs attribuent majoritairement cette variabilité entre cimenteries aux difficultés de mesures précises, à la fois sur la teneur en polluants et sur le débit annuel de production. Dans une étude rapportant les émissions de  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  et de particules fines de 6 cimenteries Suédoises, Norvégiennes et Finlandaises sur sept ans, B. Von Bahr et ses collègues évoquent la difficulté d'obtenir des mesures de qualité, et attribuent une grande partie des variabilités aux différences technologiques [54].

De par la large quantité de production qu'il représente, ainsi que sa contribution importante aux émissions humaines de GES, l'empreinte environnementale du béton, au travers de l'ACV a gagné en intérêt dans la communauté scientifique. Les résultats sont clairs : les différents impacts environnementaux de la fabrication des bétons sont dominés par la production du ciment. C'est le constat qui est fait dans toutes les ACV sur les bétons [45], [55], [56]. Il en résulte que la tendance est au remplacement d'une fraction de ciment dans les compositions des bétons au profil d'ajout cimentaire, souvent sous-produits d'autres industries [57]. Cependant, l'utilisation de ces matériaux en ACV soulève la question de l'allocation de leur impact environnemental. Une question qui ne fait pas consensus, les auteurs privilégiant encore pour l'instant l'allocation leur étant la plus favorable. En effet, sur 42 ACV utilisant des ajouts cimentaires, plus de la moitié n'effectue aucune forme d'allocation [58]. Cela permet, bien évidemment, de trouver des résultats d'impact très encourageants pour ces bétons « verts », en comparaison à des bétons traditionnels, mais qui peuvent être remis en question par la valeur économique de plus en plus importante, et non négligeable, de ces nouveaux matériaux cimentaires. Une autre limitation qui ressort

de la littérature est le manque de vision holistique porté par l'ensemble des articles. Ceci s'illustre sur plusieurs axes de l'ACV. Tout d'abord, le manque de prise en compte des impacts autres que les émissions de GES. Bien que le béton soit réputé pour sa large contribution au changement climatique, il n'en reste pas moins que d'autres problèmes environnementaux, qui, si non couverts par les analyses, risquent de passer inaperçus [45], [47]. Ce manque de vision globale s'illustre aussi dans les frontières des études souvent limitées aux portes de l'usine. Bien que ces limitations puissent être cohérentes pour se concentrer sur l'analyse de l'impact environnemental de la production d'un matériau en particulier, il manque de prendre en considération l'utilité finale du produit : celle du service qu'il rend. Cette limitation se traduit dans la définition de l'unité fonctionnelle souvent limitée au volume ( $1\text{m}^3$ ), manquant de prendre en considération la durabilité ainsi que les performances mécaniques des bétons [43], [58]. Enfin, la dernière limitation qui transparaît de cette revue de littérature est la gestion des incertitudes. Elle est parfois évoquée pour rappeler les incertitudes inhérentes à des modélisations de cette ampleur, mais rarement investiguée avec des outils d'analyses statistiques.

## **CHAPITRE 2. OBJECTIFS DE RECHERCHE**

### **2.1. Objectif principal**

Ce projet de recherche a comme objectif principal d'évaluer l'impact environnemental, du principe d'économie circulaire en boucle ouverte, à l'aide de la méthodologie d'ACV, dans le cas de l'utilisation de poudre de verre recyclé dans le béton en tant qu'ajout cimentaire.

### **2.2. Objectifs spécifiques**

Afin de répondre à l'objectif principal exprimé précédemment, les objectifs spécifiques suivant doivent être atteints :

O.S. 1 : Modéliser la production de la poudre de verre afin d'en dresser un portrait environnemental puis l'impact environnemental de son utilisation en tant qu'ajout cimentaire dans deux cas d'étude : (i) la construction d'un trottoir piéton, (ii) la construction d'une passerelle piétonne dans un béton à ultra haute performance.

O.S. 2 : Comparer les impacts environnementaux de cette réutilisation en boucle ouverte à des scénarios conventionnels, et soumettre les conclusions à des analyses de sensibilités et d'incertitudes.

# **CHAPITRE 3. ARTICLE 1 : IS OPEN-LOOP RECYCLING THE LOWEST PREFERENCE IN A CIRCULAR ECONOMY? ANSWERING THROUGH LCA OF GLASS POWDER IN CONCRETE**

## **3.1. Avant-propos**

**Titre français :** Le principe de boucle ouverte est-il le moins désirable en économie circulaire ? Une réponse au travers d'une ACV de poudre de verre dans le béton.

**Auteurs et affiliation :**

Joris Deschamps : étudiant à la maîtrise, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie civil.

Balint Simon : Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique.

Arezki Tagnit-Hamou : professeur, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie civil.

Ben Amor, professeur, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie civil.

**Revue :** Journal of Cleaner Production

**Date d'acceptation :** 3 Mars 2018 (<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.021>)

**Contribution du document :**

Cet article présente les résultats de l'analyse d'impact environnemental de l'utilisation de verre recyclé en tant qu'ajout cimentaire dans la fabrication d'une dalle de trottoir en béton. Il répond ainsi à l'ensemble des sous objectifs et de l'objectif principal.

**Résumé français :**

Le gouvernement du Québec (Canada) s'exerce à trouver un débouché au verre mixte issu du recyclage qui s'accumule dans les décharges. Une solution envisagée est la transformation de cette matière en une fine poudre de verre afin d'être utilisée en tant qu'ajout cimentaire, dans un principe d'économie circulaire en boucle ouverte.



Pour quantifier l'impact environnemental de ce concept, une Analyse du Cycle de Vie a été effectuée sur un cas d'étude réel (la construction d'une dalle de trottoir à Montréal, Canada). Deux scénarios différents sont ainsi comparés, la production d'un béton conventionnel, et la production d'un béton avec poudre de verre. Cette modélisation est réalisée à l'aide du logiciel SimaPro 8.2, la base de données Ecoinvent 3.2 ainsi que la méthode d'impact IMPACT 2002+. Finalement, une analyse de Monte Carlo ainsi que des analyses de sensibilités ont été effectuées sur des paramètres clés telles que la distance des fournisseurs, la durée de vie ainsi que la possible émission de particules fines lors de la production de poudre de verre. Ceci, afin d'estimer l'influence des incertitudes et de différents paramètres clés sur les résultats finaux.

Les résultats révèlent l'avantage environnemental de l'utilisation de poudre de verre comme ajout cimentaire sur l'ensemble des indicateurs. Ils soulignent aussi la contribution importante de la production du ciment. Il apparaît en effet comme contributeur principal sur la plupart des indicateurs problèmes, ainsi que sur les quatre indicateurs dommages. Cette contribution est particulièrement marquée sur l'indicateur de changement climatique. Elle représente 74% et 68% des émissions de GES dans le cas du scénario conventionnel et avec poudre de verre, respectivement. Les émissions de différentes particules dans l'atmosphère tels que le CO<sub>2</sub>, les NO<sub>x</sub> et les SO<sub>x</sub> issues des cheminées des cimenteries jouent un rôle majeur dans l'empreinte environnementale du béton. Un autre résultat clé est l'importance des distances de transport des matériaux de base, pouvant inverser les résultats.

L'originalité de cet article réside dans l'analyse de l'impact environnemental d'un cas de recyclage vers le haut (*up-cycling*) du verre mixte en tant qu'ajout cimentaire. Cette étude permet une meilleure compréhension de l'impact du béton, et met en évidence la mesure dans laquelle les avantages environnementaux subsistent. A plus grande échelle, cette étude vise à encourager les municipalités et/ou gouvernements qui luttent avec des déchets communs tels que le verre mixte, à trouver des symbioses industrielles à l'échelle locale.

### 3.2. Abstract

The government of Quebec (Canada) is trying to find a useful outlet for the mixed waste glass pilling up in its landfills. One solution to consider is the use of fine glass powder from mixed waste glass as alternative cementitious materials (ACM) in concrete, using an open-loop circular-economy principle.

To quantify the environmental feasibility of this concept, life cycle assessment (LCA) methodology, in combination with a real case study (i.e., a concrete sidewalk in Montreal, Canada) are both assessed. More specifically, two different scenarios are compared, the business-as-usual (BAU) concrete production model, and a glass powder (GP) concrete production process model. All modeling efforts are performed using SimaPro 8.2 software, the Ecoinvent 3.2 database and the IMPACT 2002 + impact method. Finally, a Monte Carlo simulation, in addition to different sensitivity analyses, are carried out to assess the influence of data uncertainty and key parameter changes, such as the distance from suppliers, potential lifetime extension of the concrete, and possible particulate emissions during GP production.

Results show the environmental benefits of using GP as an ACM in terms of every indicator. Moreover, the significant contribution of cement production in the environmental burden of concrete is noted. It appears as the main hotspot in most midpoint indicators, and in all four endpoint indicators. It is especially highlighted as a global warming indicator, with 74% of the greenhouse gasses (GHG) related to cement production for the BAU scenario and 68% for the GP scenario. The emissions of particles into the atmosphere (such as CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, and SO<sub>x</sub>) from the clinker kiln chimney plays a major role in the overall environmental impact of concrete production. Another key result is the importance of transportation distance of the base materials, which could reverse the conclusion.

The originality of this paper relies on the environmental assessment of the up-cycling of GP as a supplementary cementitious materials (SCM) in concrete. Indeed, this study allows for a better understanding of environmental impact of concrete and highlights the extent to which environmental benefits remain when mixed waste glass is used in an open-loop

circular-economy context. At a larger scale, this study aims to encourage all municipalities/government that are struggling with common waste – such as mixed waste glass – to find industrial symbioses at a local scale.

Keywords: Life cycle assessment; Open-loop; Monte carlo; Waste glass; Alternative cementitious material

### 3.3. Introduction

A circular economy (CE) is one of the main concepts that emerged from the waste and resources debate [59], and interests surrounding it are growing in the scientific life cycle assessment (LCA) community [60]. As opposed to the usual "make, use, and dispose" approach, CE advocates the minimal extraction of raw materials and the maximization of service life by promoting reuse, recycling, and recovery [10]. In other words, the concept is to transform waste into a valuable resource by designing the product to be easily repairable, recoverable, and used as primary materials for the same industry (closed-loop) or another industry (open-loop). For example, closed-loop systems help in rethinking the way in which products are owned. By transforming the ownership of an object into a service rent, the product can be redirected to the manufacturer. Because the product was designed under CE principles, it can be easily repaired or disassembled to be used as primary materials to create other products. Open-loop recycling reflects a more biological-inspired concept. In the living world, there is no waste, as the remains of one species become the breeding ground or the basis for another one. The goal of open-loop circulation is to replicate this symbiosis for manufactured products at the industrial scale [1]. One great application of this model is mixed waste glass that could be used as a supplementary cementitious material (SCM).

In Quebec, Canada, despite a recovery rate of glass near 85% [61], mixed waste glass struggles to find viable uses/markets. In 2015 more than 192,000 tons of glass were collected from municipal sources [61]. Indeed, mixed waste glass is considered as a low value resource because it is a blend of different glass types (brown, green, etc.) that contain small impurities [2]. Most of it comes from municipal sources, where color selective or glass only collection is not implemented. Thus, its reuse in the production of new glass in

a closed-loop model requires a lot of post-treatment to meet the quality standards of the industry production chain. Therefore, in Quebec, most waste glass is sent to landfill sites [62].

However, finely ground glass is now known to have pozzolanic properties [3]. This means that when used as a partial replacement for Portland cement (PC) (in other words, as an SCM), it chemically reacts with the products of cement hydration to generate calcium silicate hydrate, the complex compound responsible for concrete's strength. Indeed, when used as an alternative to common SCMs (silica fume, fly ash, or ground granulated blast-furnace slag), glass powder could lead to a gain in compressive strength in concrete [3], [33]. Therefore, the use of GP in concrete could lead to a significant improvement in durability [36], [37], [63]. The potential reduction of cement content in concrete could meet the efforts employed by the industry and research communities to lower the environmental footprint of concrete production [57], [64], [65]. Indeed, cement production alone is responsible for 5 - 7% of all anthropogenic CO<sub>2</sub> emitted worldwide [50].

To analyze the potential environmental burdens associated with concrete production, life cycle assessment (LCA) is an appropriate tool to investigate the potential environmental impacts via a holistic approach through the entire life cycle, from materials extraction to end of life. This approach is often used to assess the environmental burdens of non-conventional concrete [43], [45], [47] and is highly recommended when conducting CE policies [66]. Indeed, LCA is used to assess -- through an extensive list of indicators -- the performance of circularity of a product, or a system. Even though, LCA does not embrace the social, economic, and technical complexity of the represented systems [67], LCA remains essential to appreciate the full picture of CE systems in the context of a sustainable development framework. In studies assessing the environmental benefits of CE, open-loop systems are often neglected, compared to closed-loop systems, because they are mainly used in product systems with lower quality requirements [68]. However, the environmental benefits of closed-loop and open-loop systems over landfilling have been recommended in the case of waste glass [69], and over landfilling (and/or incineration with energy recovery) in the case of plastic recycling [70]. In the case of open-loop recycling, a previous study (i.e. Saad et al., 2015) considered the environmental benefit of avoiding the production of

the replaced material. The use of waste glass powder as a partial replacement of cement appeared as a good alternative to landfilling, mainly because it avoids the production of cement. However, to the best of our knowledge, there is no study addressing the environmental benefit of this waste glass utilization in the context of an application, and hence, in the context of a functional equivalence.

The assessed concrete in this study is based on a sidewalk construction project carried out for the House of Sustainable Development in Montreal, Canada. The Research Laboratory on Alternative Cementitious Materials (LMCA) at the University of Sherbrooke designed a concrete mixture containing GP (fulfilling the sidewalk construction standards) to be poured into new sidewalk sections. Many LCA studies were found dealing with roadways, but only a few focused on pedestrian pavements [55], [71], [72]. These studies provide meaningful LCA comparing different sidewalk systems (slabs, continuous concrete layer, and interlocking blocks) and/or materials (concrete, asphalt, granite), and share crucial recommendations to reduce the environmental footprint of sidewalks. Among them are the reduction of cement content, which appears as the main contributor of the concrete footprint, and selection of a sidewalk system relevant to its future use (regular access to the underground, pedestrian only, or motor circulation). However, they do not assess the environmental benefits, or disadvantages of, using alternative concrete in the context of open-loop recycling, and are illustrating construction methods relevant to Spanish examples, which differ from Canadian's practice.

The aim of this study is to challenge the environmental benefit of using open-loop CE principles in the waste management of glass, using a real case study that is laboratory tested in order to ensure the functional equivalence. Therefore, this paper analyses and compares the life cycle environmental impacts of two concrete applications; a conventional concrete sidewalk, referred to as the business as usual (BAU) scenario, and one containing a GP concrete sidewalk, referred to as the GP scenario.

### 3.4. Methodology

To reach this paper's objectives, two scenarios were modeled and compared using the following methodology, in accordance with the following LCA standards [39], [40]:

- *Goal and scope* defines the aim of the study and describes the functional unit and the boundaries of the study;
- *Life cycle inventory (LCI)* compiles the data associated with the system analyzed. These data include materials and energy-related inputs, along with the environmental outputs of all life cycle stages;
- *Life cycle impact assessment (LCIA)* calculates the potential environmental impacts based on the multiplication of the data set from the LCI with different characterization factors from a selected impact assessment method;
- *Interpretation* evaluates the LCIA results to identify the hot spots of the overall environmental impact and assesses the robustness of the results and the influence of different parameters by using a different sensitivity and uncertainty analysis.

#### 3.4.1. Goal and scope

The goal of this study is to determine the potential benefits due to the use of GP as an SCM in concrete, to identify major contributors of the overall environmental impact of sidewalks, and to define the main sensitive parameters of the results. The functional unit (FU) is defined as follows: Providing an adequate service to pedestrians over a one meter long by two meters wide sidewalk for 40 years. The sidewalk shall comply with Canadian "best construction practices" [73]. Figure 3-1 presents the system boundaries of the assessed sidewalk's life cycle. All of the relevant life cycle stages, such as the production phase, the use phase, and the end of life (EoL) phase, are represented. Both sidewalk types have a similar structure. Differences are mainly based on the mix design, which is extensively presented below (see Table 3-1).

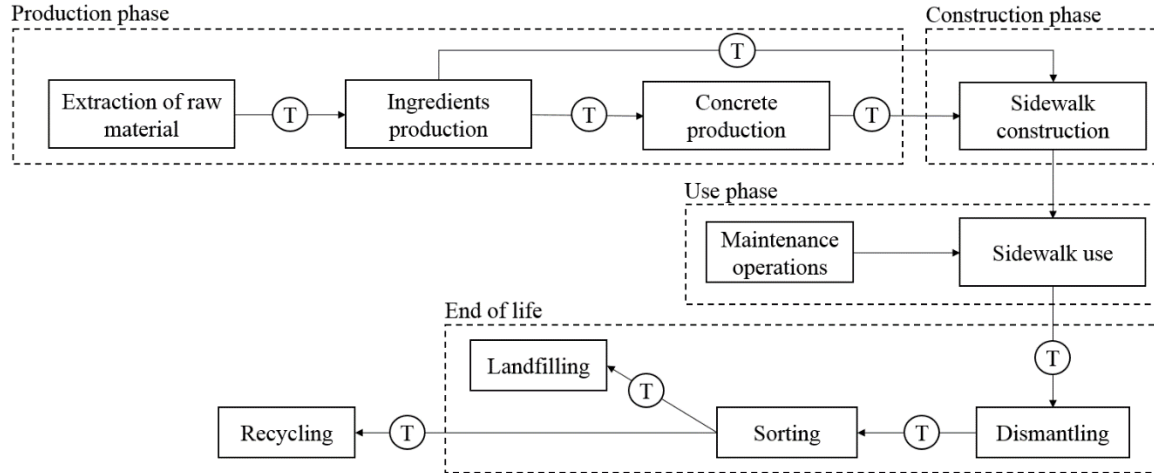


Figure 3-1 . System boundaries of the sidewalk life cycle (T refers to transport)

### 3.4.2. Inventory

The software used to conduct the assessment was SimaPro 8.2, and the database used to model both sidewalk product systems was Ecoinvent 3.2 [74]. Detailed information on the inventory is available in supplementary materials (Table A-1, A-2, A-3, A-4 and A-5).

#### Production and construction

The sidewalk production refers to the exploitation (extraction, mining, etc.) of raw materials necessary for the required concrete mix ingredients. The sub-processes, like coarse aggregate mining, sand mining, and concrete mixing, are connected through transport processes such as freight transportation by road or by train. The production life cycle stage of both sidewalks stops before the construction phase. Table 3-1 details the mix design of the two concrete mixtures used in the current case study. The BAU concrete scenario contains only the conventional ingredients, such as PC, sand, coarse aggregate, water, and chemical admixtures (i.e., air entraining and water reducing admixtures). The novel mix contains the same components, with the addition of GP as a partial cement replacement, which modifies the quantities required for each material.

Tableau 3-1 Concrete-ready mix design for both scenarios

Materials	Units	Reference concrete	Glass concrete
GU cement	kg	435	320
Glass powder	kg	0	80
Water	kg	175	168
Sand (0-5 mm)	kg	728	688
Coarse aggregate (5-20 mm)	kg	1007	1040
Water reducing admixture	ml/100 kg of cement	250	180
Air-entraining admixture	ml/100 kg of cement	135	60
Density	kg/m <sup>3</sup>	2345	2296
Life span	years	40	40

Figure 3-2 presents a cross section of the modeled sidewalk. The construction process contains three main steps: excavation work, setting up the different layers of the sidewalk (presented in Figure 3-2), and compaction work. The model of the excavation work, the material production, and the compaction work are based on previous studies [74]–[76]. The exposed concrete layer on the top is a 100 mm thick slab. Under it is a subbase of granular material, coarse aggregate, 150 mm deep. Beneath the subbase, a rigid polystyrene insulation helps to prevent differential settlement of the surface. It is also recommended to use geotextiles at the sides of the subbase to protect the granulate materials and overall structural integrity [73]. Geotextiles can be made of distinct polymer types like polyamide, polyethylene, or polyvinyl chloride. In the present study, polypropylene-based geotextile is used due to its availability, relatively low price, and favorable physical properties [76]. The structure in Figure 3-2 is applicable for both scenarios presented in Table 3-1 (i.e., BAU and GP scenarios).

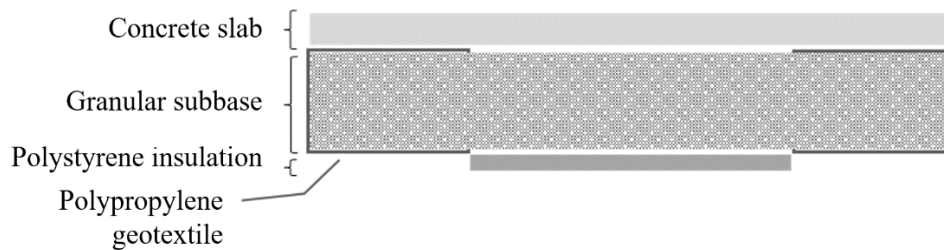


Figure 3-2 Sidewalk design used for the case study (not to scale)



The production of the transformation of post-consumer glass into fine glass powder is modelled following the recycled content cut-off approach [77]. The environmental impact of the production of the glass itself is allocated to its first use (glass bottle, jar container, etc.), and no credits are allocated to the system under study for avoiding the final elimination of waste glass. However, the impacts related to the recovering process are modelled. It includes the transportation from the landfill, where the waste glass is stocked, the energy required to produce the fine glass powder, and the different infrastructure used in the production site. This approach was selected because the raw materials for the production of pozzolanic glass powder is exclusively waste glass cullet only, and the volume used is just a marginal part of the total waste glass. Information regarding the energy and materials needed during the glass powder production process has been provided by the industrial producer and are described in the supplementary materials section (Table A-6).

#### Use phase

The use phase refers to everyday practices in urban areas, like sweeping, snow clearing, salting, washing, and maintenance. They are not assessed in the model because they were considered to be the same from one scenario to another, and hence equal (as both scenarios have the same life span). Thus, exclusion of these sub-processes from the model does not affect the comparison. Regarding the possible gain in performance that the glass powder could confer to the concrete; the hypothesis of assuming the same maintenance operations is optimistic with regard to the BAU scenario and pessimistic for the GP scenario.

#### End of life

The end of life refers to the dismantling, transportation, and final disposal in a landfill of the sidewalk at the end of its service life. The concrete layer and the granular subbase are both sent to the landfill without any reuse in both the BAU and GP scenarios. s

### 3.4.3. Life cycle impact method, software, and database

The selected impact method to assess and compare the potential environmental impacts of both cases is IMPACT 2002+ [78], which links LCI results to a set of impact categories:

- 15 midpoint indicators that translate the impacts into environmental media via a problem-oriented approach, such as: global warming, acidification, ecotoxicity, nutrification, eutrophication, etc.
- 4 endpoint indicators that translate the damage of those midpoint indicators into issues of concern, such as human health, climate change, natural resources, and ecosystem quality.

#### 3.4.4. Interpretation

Interpretation of the case study was carried out in section 3 (Results and discussions). In that section, the relative comparison of the two cases with IMPACT 2002+ indicators provides the general impact differences between each scenario. The contribution analysis identifies and explains the main hotspots for each environmental impact. Finally, the robustness and the stability of this interpretation is tested through a sensitivity analysis and a Monte Carlo analysis.

##### Sensitivity analysis

To identify key parameters that influence most of the outcomes, different hypotheses of the model were modified. The first sensitivity analysis involved changing the life cycle impact method by TRACI V2.1 [79]. Despite covering less environmental indicators than IMPACT 2002+ [80], TRACI V2.1 was developed for the North American geographic context.

The output of the results could also be affected by data from the model itself. So, to estimate the variability of the real case, different scenarios were modeled, thus changing the inventory of the base GP scenario (see Table 3-2).

Tableau 3-2 Proposed scenarios for the sensitivity analysis

Scenario name	Description	Main changes
BAU Scenario	Business as usual, normal concrete	-
GP Scenario	Glass powder concrete	-
Scenario 1	Glass concrete with other distant suppliers	Add 300 km of train transportation for the three main concrete component (cement, sand, gravel)
Scenario 2	Glass concrete with longer life span (x 1.3)	Reduce by 33% the intermediate flow required to fulfill the functional unit
Scenario 3	Glass concrete with particulate emissions	Add a specific indoor particulate matter emission of 0,0125 g/kg <sub>product</sub> and 0,0302g/kg <sub>product</sub> for PM2.5 and PM10 respectively [81]
Scenario 4	Glass concrete with subbase aggregate reused	70% of the aggregate subbase is recycled, meaning the emissions due to its landfilling are no longer relevant

Four main parameters were modified independently for each scenario. The first parameter that was modified is the distance supplies had to travel for the concrete main ingredients (cement, sand, and gravel), in order to show the influence of transportation on the results (scenario 1). The new distances are based on real life suppliers. Then, as mentioned before, the use of GP as an SCM in concrete can significantly enhance its durability. This can be seen when testing and comparing our two case study concretes with various performance indicators. Table A-7 (of the supplementary materials) shows that the GP concrete shows better results in every performance indicator tested (compressive strength, tensile strength, torsion resistance, and resistance against chloride). Although the relationship between these physical properties and the lifetime of the concrete are not necessarily linear, it is reasonable to assume a 30% improved lifetime of the GP concrete. The implication of this change on the results was tested in scenario 2. Another reasonable assumption that is made in scenario 3 is the particulate emissions during the production process of a fine glass powder. Small particulate emissions can be a serious issue for onsite workers, and we wanted to see its implications on the final results. The estimation of those particulate emissions is based using a proxy of crushed stone processing and pulverized mineral processing from the U.S. Environmental Protection Agency [81]. Finally, scenario 4 attempts to evaluate the impact of recycling practices, which are encouraged on sidewalk construction sites, and entail the reuse of a ratio (estimated at 70%) of the subbase gravel.

## Monte Carlo analysis

Monte Carlo analysis is a method used to assess the propagation of data uncertainty through the final results [82]. It is a crucial step to address the robustness of the conclusions obtained in the interpretation, regarding the soaring quantity of data required to perform an LCA. The uncertainty of the input data were quantified using the pedigree matrix approach for LCA [83]. Each input parameter was evaluated from 1 (good) to 5 (bad) on five quality criteria: reliability, completeness, temporal correlation, geographical correlation, and technological correlation. The grades obtained are linked to uncertainty factors that allow the calculation of the geometric standard deviation of the lognormal distribution of the data in consideration [84]. Five thousand iterations were done to assess the uncertainty when comparing the BAU and the GP scenarios. Because we are focusing on a comparative assessment, dependent sampling were only used between the two scenarios [85].

## 3.5. Results and discussions

### 3.5.1. Comparative results and contribution analysis

Figure 3-3 shows the relative comparison of potential environmental impacts of the BAU and GP scenarios on midpoint indicators and the relative contribution of the four main stages of their life cycles. Detailed numerical results are presented in supplementary materials (Table A-1).

"Concrete layer" represents the production and transportation of the concrete. It includes the production and transportation of cement, aggregates, water, glass powder, and chemicals. It also includes the energy needed to mix all of those materials and to produce the concrete. "Subbase materials" refer to the production and transportation of the polystyrene, geotextile, and gravel included in the subbase layers. "Construction" represents all processes and materials used during the construction of the sidewalk, such as excavation, soil compacting, and wooden formwork. "End of life" represents transportation to the landfill and the emissions linked to the dismantling and retaining of materials in the landfill.

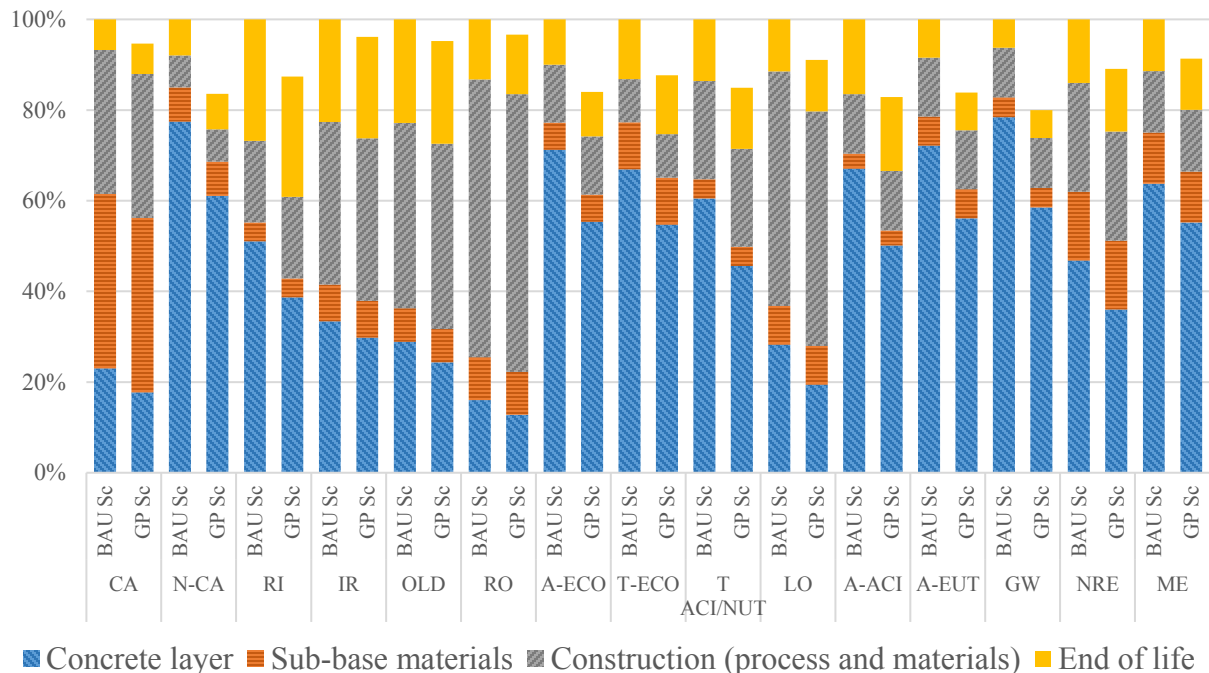


Figure 3-3 Comparison of the midpoint results of the business as usual scenario (BAU Sc) and the glass powder scenario (GP Sc) using Impact 2002+ [Carcinogens (CA), Non-carcinogens (N-CA), Respiratory inorganics (RI), Ionizing radiation (IR), Ozone layer depletion (OLD), Respiratory organics (RO), Aquatic ecotoxicity (A-ECO), Terrestrial ecotoxicity (T-ECO), Terrestrial acidification and nutrification (T-ACI/NUT), Land occupation (LO), Aquatic acidification (A-ACI), Aquatic eutrophication (A-EUT), Global warming (GW), Non-renewable energy (NRE), Mineral extraction (ME)]

The first observation that can be made is that the GP scenario always has the lowest potential environmental burden for every midpoint indicator compared to the BAU scenario. The biggest difference can be noted on the global warming (GW) indicator, with a reduction of 20%, whereas the lowest reduction is of respiratory organics (RO) (3%). Figure 3-3 shows that the extraction and fabrication of the base materials of the sidewalk (*subbase materials* and *concrete layer*) dominate the potential environmental impacts in most indicators. It also reveals the strong contribution of the concrete production in some categories, like GW, non-carcinogens (N-CA), aquatic and terrestrial ecotoxicity (A-ECO and T-ECO), aquatic eutrophication (A-EUT), and respiratory inorganics (RI). However, the construction phase stands out as a major contributor in a few other categories, like RO and LO. The reduction of this impact is mainly due to the fact that GP production has a significantly lower environmental impact than that of the Portland cement it replaces

(Figure A-1). That is why the indicators where the cement contribution is high (like GW, A-ECO, A-ACI, N-CA) in the overall impacts are therefore the ones where the difference between the BAU and the GP scenarios are more significant. On the other hand, when the cement contribution is small (as is the case for CA, OLD, and RO), the difference between both scenarios is less significant. Table 3-3 allows us to explain and understand those results, by giving more detailed information on the main contributors of each midpoint indicator.

Tableau 3-3 Major contributor and elementary flows for each midpoint indicator

	Life cycle stage	Major process contributor	Elementary flow
Terrestrial acid/nutri	Concrete layer	Cement/Clinker	Nitrogen oxides
Respiratory inorganics			TCDD
Non-carcinogens			Sulfur dioxides and nitrogen oxide
Aquatic acidification			Carbon dioxide
Global warming			Aluminum
Aquatic ecotoxicity		Cement/Blasting	Phosphate
Terrestrial ecotoxicity		Cement/Hard coal	Hard coal
Aquatic eutrophication			Nickel
Non-renewable energy		Cement/Ferronickel	Carbon-14
Mineral extraction			
Ionizing radiation	Concrete layer (BAU scenario) Construction (GP scenario)	Cement (BAU scenario) Excavation (GP scenario)	
Carcinogens	Sub-base material	Geotextile/Propylene granulate	Hydrocarbons, aromatic
Land occupation	Construction	Wooden formwork	Sawlog and veneer log
Respiratory organics		Soil compacting/Vibratory rammer	VOC
Ozone layer depletion	/	Petroleum production	Halon 1301, Halon 1211, CFC

The major contribution of concrete over most of the impact is explained by the cement production in itself. Indeed, for GW, T-ACI/NUT, RI, N-CA, and A-ACI, the fabrication process of clinker -- the main ingredient of cement -- requires a combustion of various fuels in a furnace reaching around 1,450° Celsius. The combustion emits large quantities of different pollutants into the atmosphere, such as carbon dioxide, nitrogen oxides, and sulfur oxides. These pollutants are responsible for producing acidic rains (T-ACI/NUT and A-

ACI). Small particulates under 2.5µm (RI) and dioxin 2,3,7,8 tetrachlorodibenzo-p (TCDD) are also emitted and have carcinogenic and non-carcinogenic effects on human health (CA and N-CA). The production of the hard coal, used as fuel in the furnace, also appears as a major environmental contributor. Besides being a non-renewable energy resource (NRE), hard coal mining generates significant aluminum pollution due to the blasting process, which then exposes living species, contributing to the ecotoxicity indicators (A-ECO and T-ECO). Because of phosphate spoil in water during various mining operations, hard coal is also a main contributor to eutrophication (A-EUT). The mineral extraction indicator is not driven by the extraction of concrete base materials but rather by nickel extraction from various background processes. Indeed, the nickel mineral is processed as a ferronickel and then used in steel production to build infrastructure. In our case study, it is the steel that is used in cement or concrete factories and machineries. The ionizing radiation (IR) refers to the radioactivity that comes from the treatment of low level radioactive waste and nuclear electricity production, which are used in multiple background processes of every process and material used in the model. This is mainly driven by Quebec's electricity consumption mix, which imports a small portion of energy from Ontario and from the northeastern United States (NPCC), both using nuclear power plants. The emission in air of aromatic hydrocarbons during polypropylene production explains the high contribution of the geotextiles in the carcinogens indicator (CA). The construction has a clear and significant impact on two indicators. As expected, land occupation (LO) is driven by the land use required to produce the wooden products needed for the formwork. The volatile organic compound (VOC) emissions during the soil compaction process affect the respiratory organics (RO) indicator. Ozone layer depletion (OLD) is driven by halon and CFC leakage during petroleum production, which is used in multiple processes of the product system requiring petroleum or diesel fuel consumption (for machines or heat), such as clinker production, the construction and dismantling of machinery, or the freight. Regarding GP, its environmental impact should be mainly driven by the electricity production needed to crush the glass into a fine powder. This production being done in Quebec, where most electricity is generated from hydropower; so the contribution of GP to the overall environmental impact of concrete is low. It goes from 0.1% on LO up to 2.9% on IR. Regarding the influence of transportation, it is particularly

significant on ecotoxicity indicators (around 20% in T-ECO and 10% on A-ECO), mainly because of the brake wear and tire emissions.

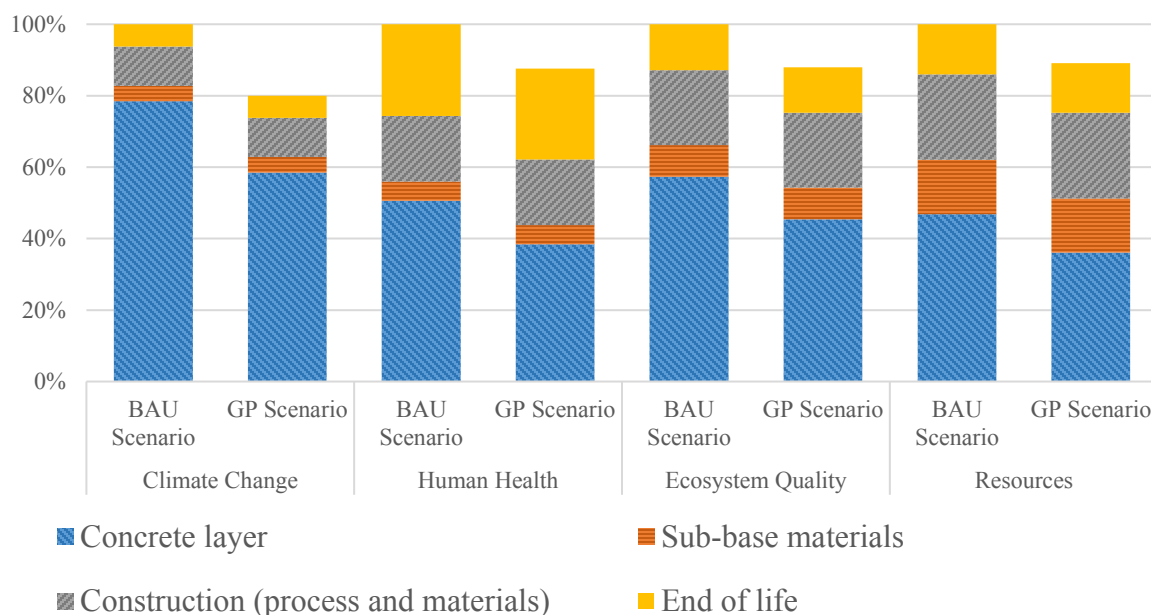


Figure 3-4 Comparison of the endpoint results of the business as usual scenario and the glass powder scenario using Impact 2002+

Figure 3-4 presents a relative comparison of potential environmental impacts of the BAU and GP scenarios using IMPACT 2002+ endpoint indicators. These results confirm the observations made from Figure 3-3: the GP scenario always has a lower environmental impact than the BAU scenario. The concrete layer production confirms even more its important contribution to the environmental impact because it drives every endpoint indicator. Table A-9 (presented in the supplementary material) explains why by showing the contributions of midpoint, problem-oriented indicators to the endpoint damage-oriented indicator. For instance, respiratory inorganics represent a very large contribution to the human health damage indicator (more than 94%), and it is mainly driven by the nitrogen oxides emitted during clinker production. The end of life being a significant contributor to respiratory inorganics, mainly because of particulate emissions during concrete dismantling, it appears also as a significant contributor to the human health indicator. The ecosystem quality indicator is mainly driven by the T-ECO (60%), LO (22%), and T-ACI/NUT (16%). Climate change is necessarily driven by the global warming indicator.



Regarding the resources indicator, it is mainly driven by the non-renewable energy indicator (99.8%). But, even though fossil fuel energy use is an important problem of cement production, the non-characterization in IMPACT 2002+ of the depletion of mineral material (like sand, gravel, clay, or limestone), may underestimate this issue while overestimating the contribution of construction machinery fuel consumption.

### 3.5.2. Sensitivity analysis

Using a different life cycle impact method, in this case TRACI over IMPACT 2002+, shows no significant differences (see Figure A-2 in the supplementary materials). The observation obtained when comparing the BAU scenario and GP scenarios are identical: the GP scenario always has a lower potential environmental burden than the BAU scenario. The relative difference between both scenarios are even identical between the two LCIA methods; see, for instance, the GW and OLD indicators.

The sensitivity of the results was also tested using four variations of the GP scenario (explained in Table 3-2). The four parameters that were changed are the traveling distance for the concrete, gravel, and sand supplies (Scenario 1), the life span of the GP concrete (Scenario 2), the emissions of small particulates during the glass powder production process (Scenario 3), and the re-use of the subbase gravel (Scenario 4).

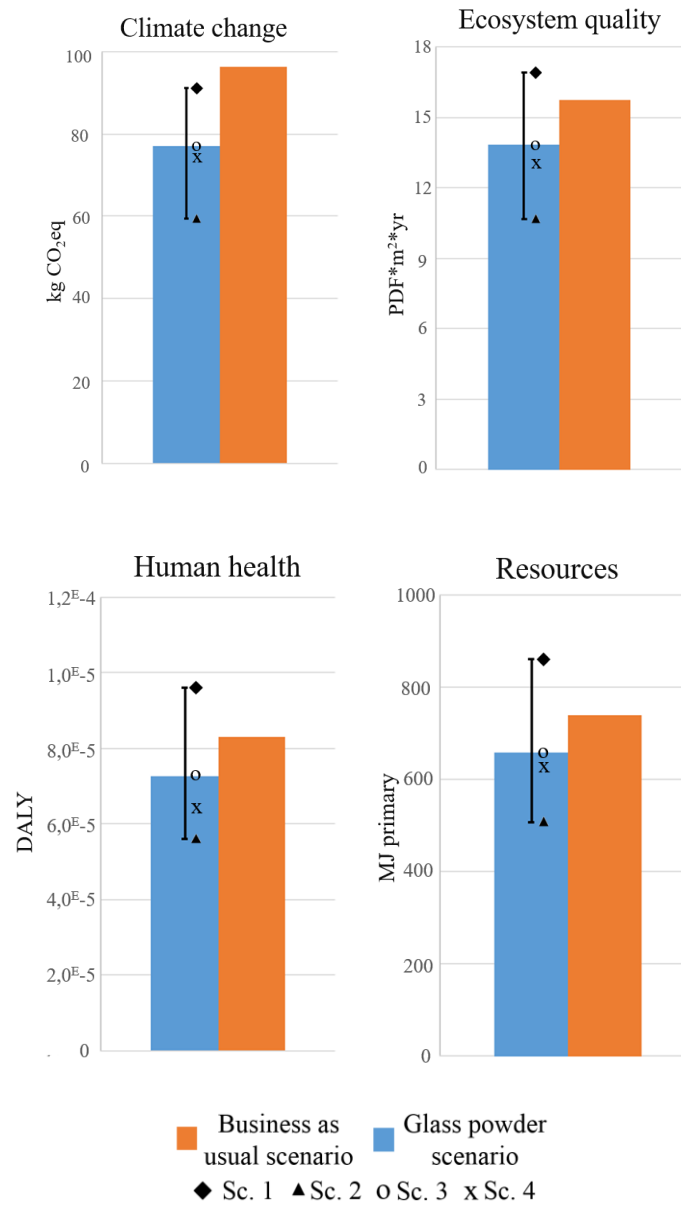


Figure 3-5 Endpoint results of the BAU scenario and the GP scenario; GP concrete with distance suppliers (Sc.1), CG concrete with extended life span (Sc.2), GP concrete with particulate emissions (Sc.3), and GP concrete with subbase reuse (Sc.4)

Figure 3-5 shows that adding three hundred kilometers of train transportation for the main ingredients (sand, gravel, and cement) of the GP concrete has a significant influence on the results, mostly because of the diesel fuel consumption of freight trains. With this scenario, the GP concrete becomes the worst solution on all endpoint indicators, except on climate change, where it releases 7% less greenhouse gases (in CO<sub>2</sub>eq) than the BAU concrete.

This draws the line where open-loop recycling becomes no more environmentally friendly to decrease the concrete footprint. The gain in durability implied by the pozzolanic properties of GP is addressed in scenario 2, where the life span of the GP concrete is improved by 30%. The result is a logical reduction of 33% on every endpoint indicator, compared to the GP scenario. The emission of small, indoor particulates due to the production of the fine glass powder is assessed in scenario 3. As a result, these emissions only affect human health, because it is related to respiratory inorganic problems. Even though the variation is barely visible (it increases the human health impact category only by 0.2% compared to the GP scenario), this issue could still be an important matter for workers at the glass powder factory, requiring appropriate health and safety protection. Scenario 4 models the possible reuse of the subbase granulates. This reduces the environmental footprint on every endpoint indicator because the emissions related to the end-of-life treatment of the subbase granulates are no longer considered (cut-off recycled content approach). The reduction, compared to the GP scenario, goes to 3% on climate change, 5% on ecosystem quality and resources, and 10% on human health. Those reductions are logically following the relative importance of the end of life stage in the endpoint indicators shown in Figure 3-5.

### 3.5.3. Monte Carlo analysis

The Monte Carlo analysis allows us to see the propagation of the uncertainty among the results and gives an indication of the robustness of our conclusions. For midpoint indicators, the uncertainty propagation can significantly affect indicators like RO, IR, CA, and OLD. It can be explained by looking at Figure 3, where the difference between scenarios on those indicators is quite low, because the main contributors are the construction processes (see Table 3-3), whose input parameters do not change from one scenario to another. The results of the Monte Carlo simulation on midpoint indicators can be seen in supplementary materials (Figure A-3).

Figure 3-6 shows the probability of having the environmental impact of one scenario superior to the other for each endpoint indicator, regarding every Monte Carlo run of the model (5,000 runs). The result of the Monte Carlo simulation on endpoint indicators shows that in a large majority of iterations, the BAU scenario has a greater environmental impact

that the GP scenario. This is especially significant on climate change indicators, where the conclusions are almost never overturned (0.04% of the time); whereas it is the case for human health and resources in 6.2%, 7.8%, and 8.8% of the time, respectively. This confirms a strong confidence in our first conclusions.

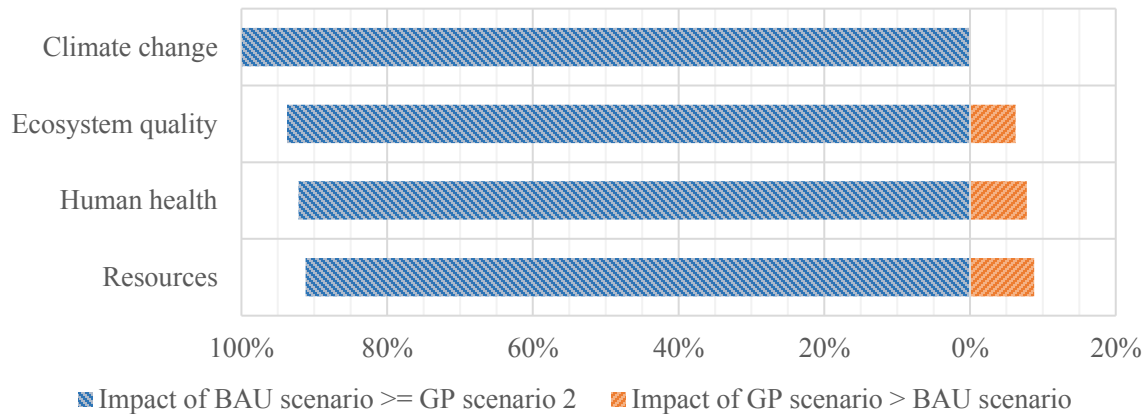


Figure 3-6 Results on Impact 2002+ endpoint indicators of the Monte Carlo analysis (confidence interval: 0.95; 5,000 iterations)

### 3.6. Conclusions and perspectives

The use of post consumed mixed glass, in an open-loop circular approach as a supplementary cementitious material, can reduce the overall environmental impact of concrete production and use. The LCA performed on a pedestrian sidewalk shows reductions in every environmental indicator, midpoint as well as endpoint. For instance, the concrete containing GP allows a greenhouse gases emission reduction of 20% (in CO<sub>2</sub>eq) compared to the BAU scenario. The contribution analysis highlights the significant contribution of cement production on most midpoint indicators, as well as the remarkable contribution of construction processes, like soil compacting or the wooden formwork, on the other midpoint indicators. Endpoint contribution analysis reveals the relative importance of each midpoint in the damage-oriented indicator, which is dominated by clinker production. We also highlight the limitation carried by the methodology addressing the mineral depletion, that fail to address the impact of basic concrete extractions like sand, gravel, limestone, or clay. Sensitivity analysis on scenario and uncertainty propagation reveals the stability of these conclusions. However, special attention should be given to the

transportation distance of the selected raw materials. Indeed, a faraway supplier of the main ingredients could increase the environmental burden of the GP scenario, reverse the results, and hence, make the open-loop circular approach no longer an environmentally friendly solution.

Nevertheless, the perpetual debate regarding the waste glass management system to implement in Quebec remains to be answered. The low quality of the waste glass, resulting from the collection system in place, and the difficulty to find a market for glass product makes the closed-loop approach questionable in terms of environmental benefits. When most of the waste glass comes from imported goods, it is reasonable to question the environmental benefit of a container deposit system, or an intensive waste glass sorting system, to ship to a faraway glass making industry. This is especially true when there is the possibility to up-cycle this low quality mixed waste glass to replace a relatively high environmental impact material, in an industrial symbiosis approach. The authors strongly suggest that to provide recommendations on the circular approach that could be implemented, it is necessary to perform an analysis of waste glass management in Quebec that grasps its environmental, economic, and social implications. This analysis will need to consider the actual waste glass stream qualities to find a global functional unit to compare different waste glass management systems combinations with regard to the demand for closed-loop recycling (returnable bottles, glass cullet) and open-loop recycling (SCM, glass, wool, etc.) products. On a larger scale, this study encourages municipalities or governments struggling with waste disposal of materials such as mixed glass in order to establish local symbiosis and promote upcycling and a circular approach.

# **CHAPITRE 4. ARTICLE 2 : LCA CASE STUDY OF ULTRA-HIGH PERFORMANCE CONCRETE USING GLASS POWDER AS SUPPLEMENTARY CEMENTITIOUS MATERIAL**

## **4.1. Avant-propos**

**Titre français :** ACV de béton à ultra haute performance incorporant la poudre de verre en tant qu'ajout cimentaire : une étude de cas.

**Auteurs et affiliation :**

Joris Deschamps : étudiant à la maîtrise, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie civil.

Arezki Tagnit-Hamou : professeur, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie civil.

Benoît Fournier : professeur, Université de Laval, Département de géologie et génie géologique.

Ben Amor : professeur, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie civil.

**Revue :** Sustainability

**Date de soumission :** 4 juillet 2018

**Contribution du document :**

Cet article présente les résultats de l'analyse d'impact environnemental de l'utilisation de verre recyclé en tant qu'ajout cimentaire dans la fabrication d'une passerelle piétonne en béton à ultra haute performance. Il répond ainsi à l'ensemble des sous objectifs et de l'objectif principal.

**Résumé français :**

Bien qu'étant une ressource recyclable abondante, le verre mixte issu du recyclage peine à trouver des débouchés économiquement viables. Pollué par d'autres matériaux et différents types de verre, il ne répond pas aux standards de qualité requis pour être recyclé, et finit souvent dans les décharges Québécoises (Canada). Cependant, la découverte des propriétés

pouzzolaniques du verre mixte finement broyé semble promettre un avenir en tant qu'ajout cimentaire dans l'industrie du béton.

La construction d'une passerelle piétonne a offert l'opportunité de comparer l'impact environnemental potentiel de trois types de béton : un béton conventionnel et deux bétons à ultra haute performances (BUHP), dont l'un incorpore de la poudre de verre en tant que remplacement partiel du ciment. Cette comparaison a été réalisée à l'aide de la méthodologie d'analyse du cycle de vie. Les résultats soulignent l'intérêt environnemental de l'utilisation de BUHP, en comparaison à un béton conventionnel, sur l'ensemble des différents indicateurs. A titre d'exemple, la construction de la passerelle en BUHP classique et BUHP avec poudre de verre réduirait respectivement de 42% et 53% les émissions de GES, en comparaison à un béton conventionnel. Cette tendance est aussi observable entre les deux BUHP. En effet, l'utilisation de poudre de verre permet une réduction 3% à 20% sur l'ensemble des indicateurs environnementaux, en comparaison au BUHP classique. Cependant, ces conclusions peuvent dépendre de la durée de vie effective des bétons.

## 4.2. Abstract

Despite being an abundant recyclable resource, mixed color waste glass does not meet quality standards to be recycled and is often landfilled in Quebec (Canada). Since pozzolanic properties of glass powder (GP) have been revealed, an outcome as alternative supplementary cementitious material (SCM) seems promising in the concrete industry. The construction of a concrete pedestrian bridge is an opportunity to compare the potential environmental impacts of three different types of concrete: a conventional concrete and two mixtures of ultra-high performance concrete (UHPC), a conventional one (Conv-UHPC) and the other one incorporating GP as a partial replacement of Portland cement (Glass-UHPC). Such comparison was conducted using a Life Cycle Assessment (LCA) methodology. The results highlight the environmental benefits of using UHPCs over the conventional concrete for every impact category. As an example, building the bridge with Conv-UHPC and Glass-UHPC results in 42% and 53% decrease in greenhouse gas emissions compared to the conventional concrete, respectively. Same results are also

observed when comparing the two UHPCs. Indeed, the incorporation of GP leads to a decrease for all the environmental categories from 3% to 20% of the final results in comparison to the Conv-UHPC. However, those conclusions depend on the effective life span of those concretes.

**Keywords:** Life cycle assessment, environmental impacts, ultra-high performance concrete, recycled materials, waste management.

### 4.3. Introduction

Finding industrial solutions for recycled materials is one of the big challenges of sustainable development. Mixed waste glass from the selective sorting illustrates this situation. Despite the fact of being an abundant resource, to some extent endlessly recyclable, mixed waste glass struggles to find viable outcomes. In Quebec (Canada), where the recovery rate of glass is near 85% [61], most of it is sent to landfill sites and is sometimes used as a low costing covering material for access roads [62]. Because mixed waste glass contains different types of glass, as well as small impurities, like metallic or plastic residues, it does not meet quality standards to be used in an existing industry production chain [2], [25]. However, with the pozzolanic properties of finely ground glass [3], [33], a new commercial solution as an alternative supplementary cementitious material (SCM) is possible, allowing the design of concrete with a lower Portland cement content. This initiative was underlined for its environmental benefits compared to landfill disposal or other commercial solutions such as glass wool, or glass aggregate [25], [69]. It could meet the efforts deployed by the industry to lower the environmental footprint of concrete [50], [57], [64].

In order to determine the potential environmental impact of concrete, life cycle assessment (LCA) is often used and highly recommended [43], [45], [47]. It is a holistic methodology that aims to make the inventory of every elementary flows emitted and extracted from the environment, during all the life cycle of the product. The characterization of those elementary materials by an impact assessment method translated the inventory into understandable and comparable environmental impacts [38].



The growing interest for sustainability in the material sector and the emergence of LCA, results in multiples studies addressing the environmental benefits of “greener” concrete [43], [45], [47]. The significant contribution of cement production on the environmental footprint of concrete products drives to partially replace it with SCMs, such as fly ash from coal combustion, blast furnace slag from iron and steel-making process, or silica fume from silicon and ferrosilicon alloy production. The LCA results of those concrete and their environmental benefit greatly depends on the allocation rules that was used to determine the environmental contribution of the SCM used, as it was pointed out by various authors [58], [86].

Regarding the use of glass powder (GP) as a SCM, to the best of our knowledge, only one study [46] investigated the environmental impacts of a concrete containing glass powder and compared the results to a conventional concrete, using the volume as a functional unit ( $1\text{m}^3$ ). Despite the high uncertainty of the results, the authors found a reduction in every impact category but highlight the fact that comparing the environmental impacts of concrete mixtures on a volume basis does not take into account the gain in strength when using GP as a SCM. This issue was addressed by Habert et al. when investigating the environmental footprint of ultra-high performance concrete (UHPC). Despite producing usually more  $\text{CO}_2$  than traditional concrete for the same volume [87], UHPC can have a better environmental impact if the change in design due to the improvement of the strength and durability is taken into account [88]. The other studies investigating the potential environmental impacts of recycled glass in concrete focus on its use as a replacement of natural aggregate [89]. As LCA becomes the relevant tool to address the environmental impact, the use of SCMs seems to be one of the best potential environmental burden reduction [57], [90]. However, as Gursel et al. [47] suggested, important points need to be treated carefully when assessing the environmental impact of concrete with LCA: (i) the assessment of environmental impacts needs to be holistic. It means that the panel of indicators has to be wide, and not only focused only on greenhouse gas emissions; (ii) the case of study should be relevant to the regional and technological variations; (iii) the phase or materials neglected in previous studies should not be underestimated; (iv) the justification of allocation used for SCM must be relevant; (v) the functional unit should include all relevant concrete aspects.

Taking into consideration those limitations and previous research recommendations, the main objective of this study is to estimate the potential environmental burdens of an ultra-high performance concrete using waste glass powder as an alternative SCM compared to two other concretes in a real case study: a pedestrian bridge.

## 4.4. Methodology

This section follows ISO 14044 structure, which is defined by four main methodological steps: goal and scope definition of the LCA, inventory analysis, impact assessment phase followed by interpretation [91]. It is important to note that the methodology does not cover the technical properties of the concretes under studies as is have already been covered in a previous article [92].

### 4.4.1. Goal and Scope definition

The main purpose of this study is to evaluate and compare the potential environmental impacts of three possible concrete decks for a pedestrian bridge in Sherbrooke, Quebec, Canada. The first one is made of ultra-high performance glass concrete (Glass-UHPC), using glass powder and silica fume as partial cement replacements. the second one is a more conventional ultra-high performance concrete (Conv-UHPC) using only silica fume as a SCM and finally, a conventional 35 MPa concrete (will be referred to as conventional concrete in the rest of the article). The product system under study is, therefore, the whole pedestrian bridge shown in Figure 4-1. It is 4.9 meters (16.1 ft.) long and 2.5 (8.2 ft.) meters wide [93]. In accordance with the goal and scope, an attributional LCA (descriptive approach instead of a change oriented consequential approach) is taken.



Figure 4-1 Pedestrian bridge under study

As shown in Figure 4-2, the system boundaries of this study are defined as a cradle to grave (i.e. every step of the life cycle of each concrete deck is represented from material extraction to their end of life). In order to compare the three concrete under study on the same basis, the functional unit is defined as follows: Allowing the pedestrians crossing of a ditch for 100 years.

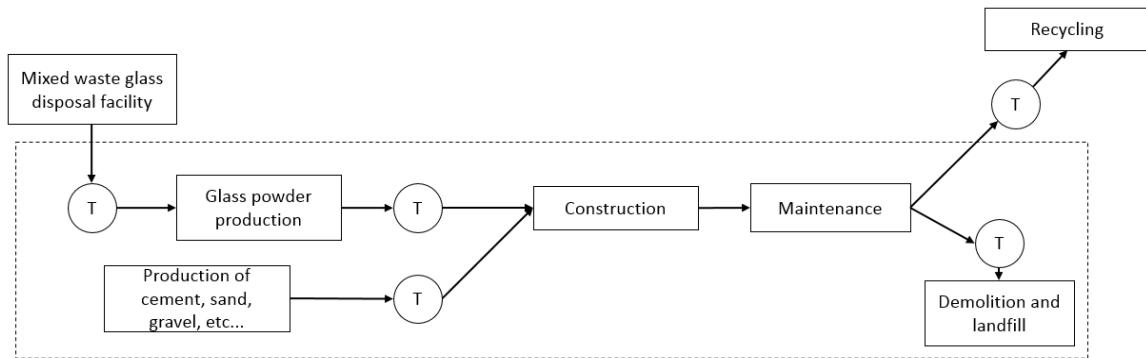


Figure 4-2 System boundaries of concrete decks under study (T refers to transport)

#### 4.4.2. Inventory Analysis

The mix design of each deck is detailed in Table 4-1. The quantities indicated represent the amount of materials required to build one cubic meter of each concrete. Mix designs of the two UHPCs were taken from the literature relating the construction of the pedestrian bridge [92], [93]. The production phase includes the fabrication of all the materials in Table 4-1.

In the case where the transport distance data were not available, markets informations from ecoinvent 3.2 database were used [74].

Tableau 4-1 Mix design for the three concrete under study

Materials	Conventional concrete <sup>1</sup> in kg/m <sup>3</sup>	Conv-UHPC in kg/m <sup>3</sup>	Glass-UHPC in kg/m <sup>3</sup>	ecoinvent data V3.2	Transport distance in km	Pedigree matrix
Cement	400	825	555	cement, portland CA-QC	227	(1,1,1,4,1)
Plasticiser	3	46	17	market for plasticiser for concrete GLO	-	(3,2,4,1,1)
Glass Powder	-	-	410	Created data <sup>2</sup>	230	(1,3,1,1,1)
Reinforcing steel	58,5	58,5	58,5	Market for reinforcing steel GLO	-	(1,2,2,4,4)
Water	178	225	226	market for tap water CA-QC	-	(1,1,4,1,1)
Sand	801	-	-	sand production GLO	116	(1,1,4,1,1)
Silica Sand	-	990	888	silica sand production GLO	116	(1,1,4,1,1)
Quartz Powder	-	232	0	silica sand production GLO (used as a proxy)	116	(1,1,4,1,1)
Silica Fume	-	229	205	Mass allocation on silicon, metallurgical grade CA-QC <sup>3</sup>	155	(1,2,2,2,2)
PVA Fiber	-	32,5	32,5	Created data <sup>4</sup>	755	(1,2,2,2,5)
Gravel	1032	-	-	market for gravel, round GLO	-	(2,3,3,4,4)
Foam block	-	8,35	8,35	market for polystyrene, expandable GLO	-	(3,3,1,1,3)

<sup>1</sup> From Mehta et Monteiro, 2006 (Mehta and Monteiro, 2006)

<sup>2</sup>From industrial source

<sup>3</sup>Global data adapted with Quebec energy mix

<sup>4</sup>From Life Cycle Inventories of Photovoltaics (Jungbluth et al., 2012)

As it can be seen in Table 4-1 UHPCs are recognizable by their high cement content, low water/binder ratio and utilization of reactive pozzolanic powder such as silica fume. Thus, traditional UHPCs have a very dense internal structure, minimizing the capillary pores, and a high density packing, allowing to reach high compressive strength [94]. Fiber's are also used to improve the material's ductility and tensile capacity [95]. Both UHPCs used in this study showed compressive strength over 150 MPa [92].

In order to fit the life span defined in the functional unit (100 years), the bill of material of each pedestrian deck, and consequently all reference flows, were scaled up or down in the simulation. The scaling factor is shown in Table 4-2 as well as the volume and the service life of each deck. The service life of a concrete construction is a complex parameter to estimate, mostly because of its prospective nature. In the case of the conventional concrete, the life span has been estimated using life-365 software[96]. ]. It is a service life prediction

model, based on the simplification of Flick's second law on chloride ions diffusion on concrete. However, the software cannot predict the service life of specific concrete using special additives, like UHPCs. Therefore, some physical properties can be examined to provide some good indications on concrete durability. UHPCs are usually recognized for their high performance on those indicators [95] leading to a high service. For example Chunping Gu et al. estimate the service life of UHPC structures in marine environment up to 200 years, where normal concrete couldn't spend 20 years [97]. Na-Hyun Yi et al. also highlighted the advantage of UHPC that could improve the service life of structures beyond 100 years with minimal maintenance requirements [30]. Regarding the Glass-UHPC used in this study, its physical properties were investigated by Nancy Soliman and colleagues in a previous paper [98]. Regarding the Glass-UHPC used in this study, its physical properties were investigated by Nancy Soliman and colleagues in a previous paper [92]. The result of their laboratory characterization of Glass-UHPC shows impressive results on durability indicators. Indeed, it shows no evidence of deterioration nor cracking after 1000 freezing-and-thawing cycles, very high resistance to chloride-ion penetration and electric resistivity, indicating a very low risk of corrosion occurring in the reinforcing steel bars, and high results on resistance to mechanical abrasion and deicing salt scaling, particularly important as the footbridge will be subjected to the action of snow removal tracker and deicing salt in winter. In regards of those results, an estimation of 120 years was decided for the Glass-UHPC, and the Con-UHPC life spans. A sensitivity analysis on those parameters was conducted to see in which extent the conclusion of our results remains valid.

Tableau 4-2 Characteristics of the three pedestrian deck types

	Conventional concrete	Conv- UHPC	Glass- UHPC
Volume (m <sup>3</sup> )	4	2	2
Service life (year)	50	120	120
Scaling factor	100/50	100/120	100/120

At this stage of the analysis, waste mixed color glass does not have a positive price value [99], and it is available as a waste product. Therefore, following the cut off recycled content approach [77], the considered impacts due to the production of glass powder are limited to the transportation from the recycling site to the glass powder factory, the energy required by machines and the infrastructure to produce the powder but exclude the production of the glass itself.

Even if silica fume is considered as a waste from semiconductor production in few studies [58], [100], [101], the great commercial interest around it, especially in the concrete sector, is now shifting its status from waste to co-product as Chen et al. mentioned, raising the question of its allocation rules [102]. On this study, mass allocation is used by taking into account the mass ratio shared by Van den Heede et al. based on Chen's work [103]: a production of 0,15 kg of silica fume for every kilogram of silicon metal (13% mass allocation).

The construction phase was adapted from ecoinvent data to match the consumption of machinery and materials production (oil, plywood formwork....) used in the real construction process.

The wooden posts, the galvanized steel handrail, the screws and the concrete bases blocks are identical for every product system under study and their service life is independent from the deck's life of service. The processes linked to those components of the bridge are strictly equal between the products systems under study, therefore they can be excluded from the system boundaries [38]. In addition, the maintenance phase is considered the same for each concrete mixture, as each deck is designed to remain without requiring major changes during its life span. As a result, the maintenance phase will not appear in the results. Moreover, a small quantity of CO<sub>2</sub> is up taken by the concrete during a process

called carbonation [104], but the amount that it represents is so negligible that it is not considered in this study [46], [104], [105].

Finally, the concrete's end of life was modelled using ecoinvent data for reinforced concrete treatment, considering that 40% of the deck volume is sent to landfill located at 29 km from the site, the other 60% being used as recycled aggregate or pavement materials [106].

#### 4.4.3. Life cycle impact method

The impact method used to calculate the potential environmental burdens of the product system is IMPACT 2002+ [78]. It is composed of 4 endpoint indicators and 15 midpoint indicators and it covers a large amount of substances compared to other American methods [80]. The list of those indicators, and the contribution of midpoints categories to endpoints categories are displayed in the table B-1 in the supplementary materials of this paper. It is important to notice that the damage factors characterizing impacts on Ecosystem Quality (EQ) caused by Aquatic Acidification (A-ACI) and Aquatic Eutrophication (A-EUT) are still under development, thus they do not contribute to the endpoint ecosystem quality. Therefore, all presented results in the following subsections will use the midpoint and endpoint indicators.

#### 4.4.4. Interpretation

Sensitivity analysis: Impact assessment method

Sensitivity analysis is highly recommended to test the robustness of results and their sensitivity to data, assumptions, and models used [38]. In our case, two different analyzes were made. The first one was on the calculation method, by changing IMPACT 2002+ to TRACI 2.1 [107]. TRACI is a North American problem-oriented method that covers less environmental indicators. It contains the following midpoint categories: global warming, acidification, ecotoxicity, eutrophication, ozone depletion, smog (photochemical oxidation), carcinogenic, non-carcinogenic, respiratory effects and fossil fuel depletion. In this context, we combine completeness (IMPACT 2002+) to adequacy (TRACI 2.1).

Sensitivity analysis: Life span

As mentioned earlier, the second sensitivity analysis will focus on the life span hypothesis of the concrete decks. This parameter changes the quantities of materials needed to fulfil the functional unit (for 100 years), and can change the outcome of the results. The tested lifespan scenarios for each deck are described in Table 4-3.

Tableau 4-3 Life span scenarios of the three concrete mix designs under study (in years)

Scenario	Conventional Concrete	Conv-UHPC	Glass-UHPC
Base case	50	120	120
Optimistic	75	200	200
Pessimistic	35	100	100

#### Uncertainty analysis: Monte Carlo

Using a large quantity of data to model as accurately as possible the system under study requires estimations and approximations on input values. Monte Carlo analysis is a robust tool to address the propagation of this data's uncertainty through the final results [82]. The pedigree matrix approach for LCA developed by Weidema and Wesnaes was used to quantify the uncertainty of input values [83].

## 4.5. Results and discussion

This section is divided in two main sections. The first one presents and compares the LCA results of the three different bridges. Then, the sensitivity of key parameters, life span and the impact assessment method, are tested to investigate the robustness of our conclusions. The LCA was carried out using ecoinvent v3.2 database [74] and SimaPro 8.2 software.

### 4.5.1. Comparative LCA results

The midpoint and endpoint results are respectively shown in Figure 4-3 and Figure 4-4. It is clear that the Conv-UHPC and Glass-UHPC have better environmental impacts than conventional concrete, for all the assessed categories. Indeed, in comparison with conventional concrete, Conv-UHPC decrease the impact from 11% on non-renewable energy (NRE) up to 74% on mineral extraction (ME). The reduction is 42% on greenhouse gases emissions (GW). Glass-UHPC allows some even greater reductions on impacts



compared to conventional concrete: from 20% on NRE up to 75% on ME, with 52% reduction on global warming (GW). These results are mainly explained by the life span of each deck. Indeed, the lesser it last, the more materials are needed to fill the 100 years-functional unit.

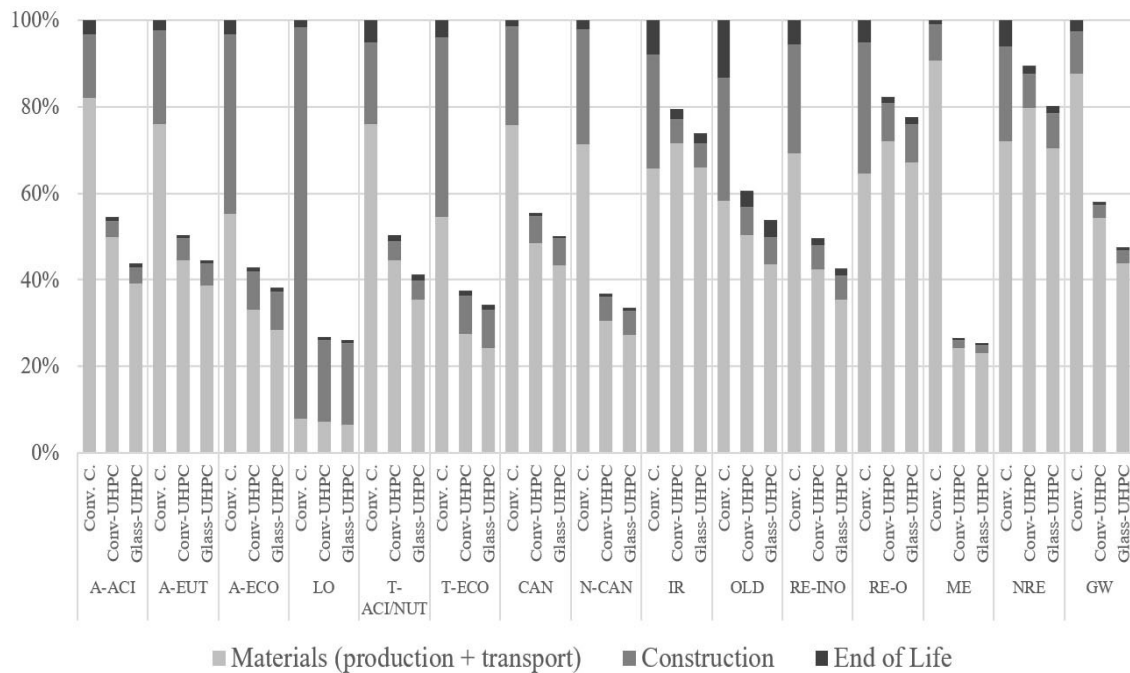


Figure 4-3 Midpoints results of conventional concrete (Conv. C.), Conv-UHPC and Glass-UHPC deck (IMPACT 2002+) [Aquatic acidification (A-ACI), aquatic eutrophication (A-EUT), aquatic ecotoxicity (A-ECO), land occupation (LO), terrestrial acidification/nutrition (T-ACI/NUT), terrestrial ecotoxicity (T-ECO), carcinogens (CA), non-carcinogens (N-CA), ionizing radiation (IR), ozone layer depletion (OLD), respiratory inorganics (RE-INO), respiratory organics (RE-O), mineral extraction (ME), non-renewable energy (NRE)]

Figure 4-3 and Figure 4-4 also highlight that materials production is the hotspot from a life cycle perspective. On the other hand, the end of life phase has negligible contribution in the environmental impacts. It is important to notice that the construction phase is the main contributor for few environmental indicators, mostly related to the ecosystem quality (EQ) like land occupation (LO), terrestrial and aquatic ecotoxicity (T-ECO and A-ECO), especially for the conventional concrete. Actually, in the case of LO, this is caused by the plywood formwork production due to the logging industry that requires big portions of land for growing trees. Regarding T-ECO and A-ECO indicators, the production of plywood

requires heat that is produced on site, via hardwood chips. The treatment of wood ash resulting from this heat production, is then directly treated and spread on agricultural land, resulting in aluminum and zinc pollution in soil, contributing in T-ECO and A-ECO. This result is also clearly visible for Glass-UHPC and Conv-UHPC on LO, but is in lesser extent for T-ECO and A-ECO. This is driven by other materials, like PVA fibers, having a significant contribution to those impacts, mitigating the contribution of the plywood production.

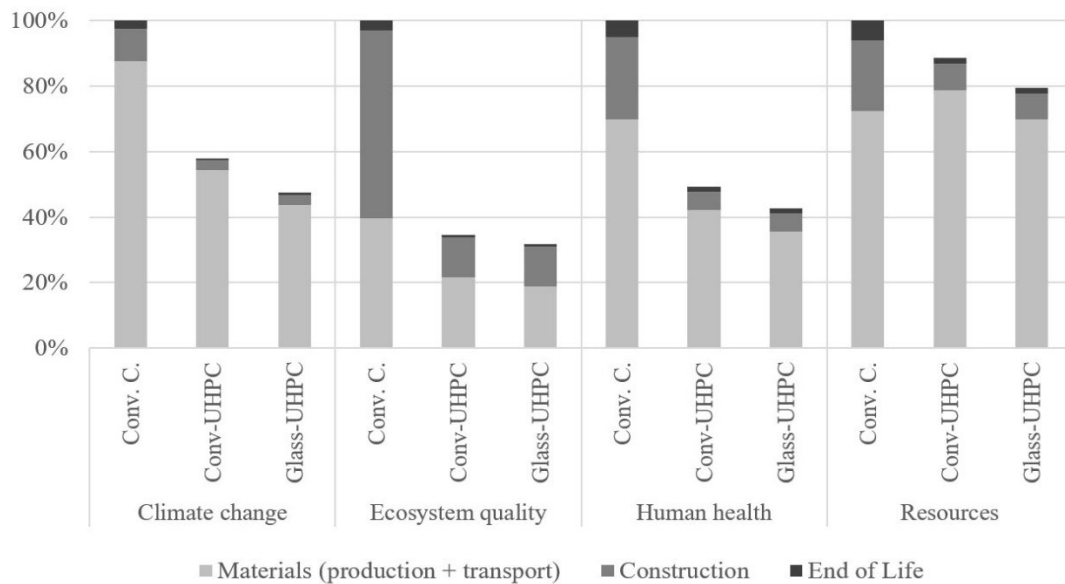


Figure 4-4 Endpoints results of conventional concrete (Conv. C), Conv-UHPC and Glass-UHPC decks (IMPACT 2002+)

Table 4-4 helps to make the contribution analysis of the materials production phase only (construction and end-of-life are excluded) to identify hotspots. The first observation that can be made is that, as expected, cement plays a major role to the global warming indicator. It is essentially due to the CO<sub>2</sub> emissions that occurred during the clinker production. However CO<sub>2</sub> emissions are not the only pollution that comes out of the clinker factory chimneys. Actually, nitrogen oxides and sulfur dioxides are also emitted and sorely contribute to respiratory inorganics (RE-INO) effects, terrestrial acidification and nitrification (T-ACI/NUT), as well as aquatic acidification (A-ACI). It is why the cement appears as a major contributor in those impact categories in Table 4-4. Cement also appears as a high contributor in T-ECO and A-ECO, because of blasting operations in hard coal

and limestone mines that emits aluminum into the air. Regarding conventional concrete the two main contributors are the reinforcing steel and the cement. But as we reach the strength developed by ultra-high performance concrete mix, the need for reinforcing steel is reduced, as well as the amount of cement needed to fulfil the service. Indeed, the decrease of the reinforcing steel and cement footprint leaves room for PVA fibers, silica fume, and plasticiser to appear as the new hot spots for Conv-UHPC and Glass-UHPC. Silica fume, a co-product of silicon metal production, also tend to be an important contributor. Indeed, nitrogen oxides, and sulfur dioxides emitted during the production process of the silicon-metal have an important contribution to the T-ACI/NUT and A-ACI indicators. However, in this case, it has been produced in Quebec, where the electricity mix is 99% hydropower energy [108]. This keeps silica fume's contribution to a reasonable level, especially for GW. In the case of PVA fiber, which is a major contributor in most midpoint categories for UHPCs, a deeper analysis of its environmental burden shows that it is the production of raw chemicals like ethylene or polyvinyl chloride that dominates the impacts. The same goes for plasticisers where, despite the small quantities involved (less than 2% of the total mass for Conv-UHPC), it cannot be ignored because of the production of complex chemicals. Regarding the impact of the glass powder production, it is only responsible for 0,5% up to 7,2% of the overall environmental impacts of Glass-UHPC. The biggest impact of glass powder is on the terrestrial ecotoxicity (7,2%) and ozone layer depletion (5,0%), mainly because of the transportation which is spotted as a high contributor for those categories.

Tableau 4-4 Main contributors of midpoints potential environmental categories (IMPACT 2002+) of Conv-UHPC, Glass-UHPC and Conventional Concrete for the material phase [Aquatic acidification (A-ACI), aquatic eutrophication (A-EUT), aquatic ecotoxicity (A-ECO), land occupation (LO), terrestrial acidification/nutrition (T-ACI/NUT), terrestrial ecotoxicity (T-ECO), carcinogens (CA), non-carcinogens (N-CA), ionizing radiation (IR), ozone layer depletion (OLD), respiratory inorganics (RE-INO), respiratory organics (RE-O), mineral extraction (ME), non-renewable energy (NRE)]

	Conv-UHPC			Glass-UHPC			Conventional Concrete	
	1st contributor	2nd contributor	3rd contributor	1st contributor	2nd contributor	3rd contributor	1st contributor	2nd contributor
OLD	PVA fiber	Cement	Plasticiser	PVA fiber	Cement	Reinforcing steel	Reinforcing steel	Cement
NRE							Cement	Reinforcing steel
IR								
CA		Reinforcing steel	Silica fume		Reinforcing steel	Silica fume	Reinforcing steel	Cement
A-EUT		Cement				Cement		
RE-O		Silica fume	Reinforcing steel		Silica fume			
RE-INO	Cement	PVA fiber		Cement	Cement	Reinforcing steel	Cement	Reinforcing steel
A-ECO								
T-ACI/NUT			Silica fume		PVA fiber	Silica fume		
A-ACI								
GW								
T-ECO		Reinforcing steel	PVA fiber		Reinforcing steel	PVA fiber		
N-CA	Reinforcing steel	Cement		Reinforcing steel	PVA fiber	Cement	Reinforcing steel	Cement
ME		PVA fiber	Cement					
LO	Silica fume			Silica fume			Cement	Reinforcing steel

It is worth mentioning that when the three decks are compared on the basis of their respective volume (without taking into account the life span and hence the functional unit), the results are completely different. Indeed, Conv-UHPC would be the solution with the higher impact on all the indicators, followed closely by Glass-UHPC. With this enlightenment, conventional concrete would decrease the impact on every indicator to 30% at least. The high Portland cement content in ultra-high performance concretes and by the alternative materials they are using, which comes from highly energetic process (like silica fume or PVA fibers) explains this inversion of the results. The results of the comparison on midpoints and endpoints indicators on the same volume for each concrete is visible on Figure B-1 and Figure B-2 respectively in the supplementary materials file.

### 4.5.2. Sensitivity analysis

#### Impact assessment method

In order to test the robustness of our results, a first sensitivity analysis was performed by changing the calculation method used from IMPACT 2002+ to TRACI 2.1. Comparing similar indicators from Figure 4-3 to Figure 4-5, highlights very similar results on the corresponding midpoints indicators, and thus, do not change our primary conclusions.

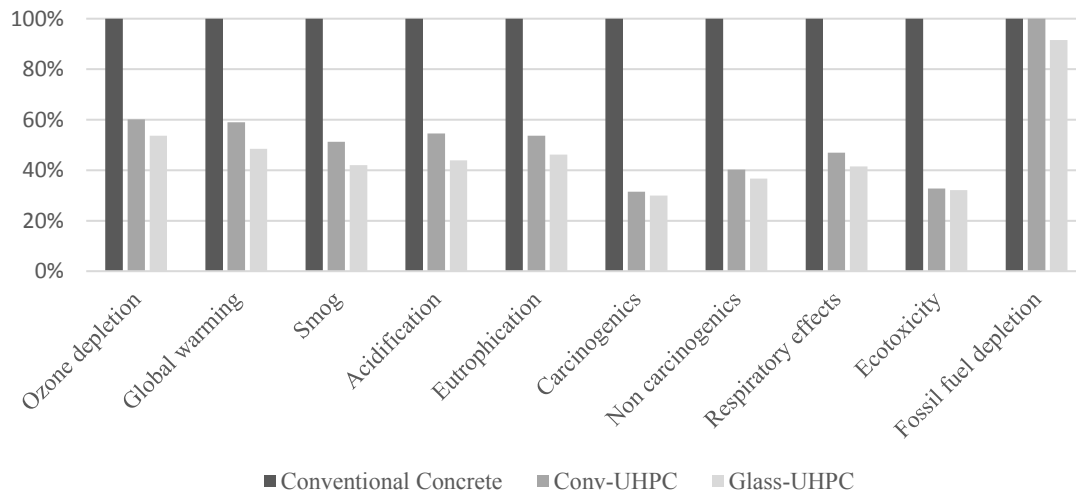


Figure 4-5 Midpoints results of conventional concrete, Conv-UHPC and Glass-UHPC decks (TRACI 2.1)

One can argue that an inversion of the results can be found when comparing non-renewable energy (from Impact 2002+) and fossil fuel depletion (from TRACI). It is important to realize that those two indicators do not represent the same thing. TRACI illustrates the rarefaction of fossil fuels (and the extra energy that will be required to extract more of those fuel), whereas IMPACT 2002+ focus only on the consumption of non-renewable energy. Crude oil and natural gas being rarer than hard coal, the hard coal consumption in TRACI contribute less to the fossil fuel depletion indicator than crude oil or gas consumptions for the same mass (this can be seen on supplementary materials Figure B-3). Both of which are more used in UHPCs, especially because of the raw chemical production of PVA fibers.

Sensitivity analysis: Lifespan

Because we are taking into account the service that must fulfil the concrete during a certain amount of time in the functional unit, the outcome of the results highly depends on the lifespan of each concrete mix. Figure 4-6 shows the change in the environmental impact of the three concretes mix, accordingly to their lifespan scenario, for the four endpoints categories. It appears that for ecosystem quality and human health, Conv-UHPC and Glass-UHPC environmental impact never overlap with the one of the conventional concrete. For the climate change indicator, the conventional concrete can be the more eco-efficient compared to the Conv-UHPC only if it reaches its optimistic scenario of 75 years, and if the Conv-UHPC lifespan falls to 100 years or under. For the resource indicator when the lifespan of conventional concrete is higher, its impact can be lower to both Conv-UHPC and Glass-UHPC. Regarding Conv-UHPC and Glass-UHPC, their impact overlap a lot because their environmental impact was already relatively close, but considering the same service life, Glass-UHPC will always have a lower impact than Conv-UHPC.

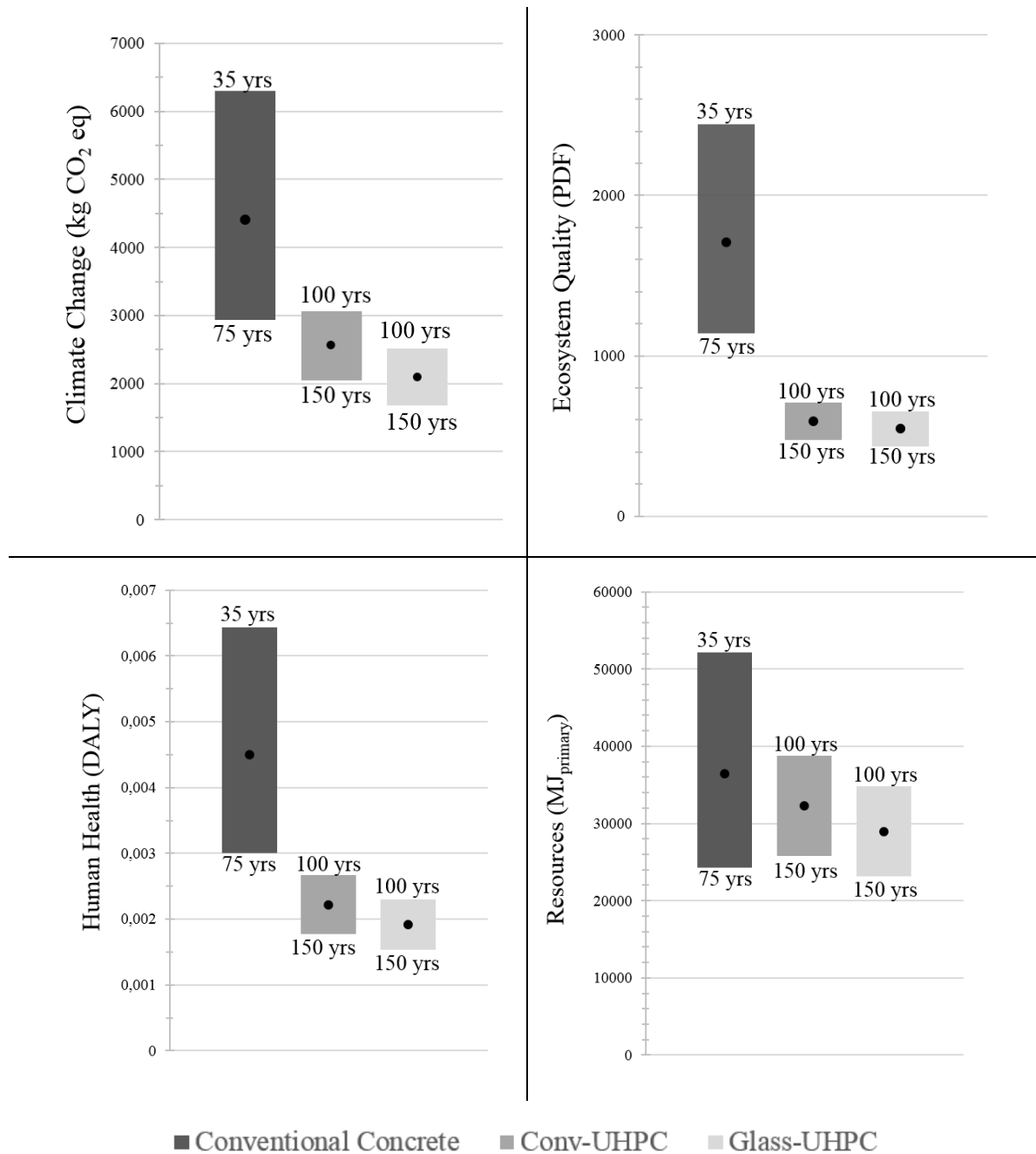


Figure 4-6 Results of the sensitivity analysis on lifespan of conventional concrete on endpoints indicators, Climate Change, Ecosystem Quality, Human Health, Resources [black points represent the original scenarios].

### 4.5.3. Uncertainty analysis

As LCA aims to model the inventory of the whole life cycle of a given system, it relies on many assumptions and hypotheses on background data. The Monte Carlo analysis allows to see the propagation of this uncertainty among the results and gives an indication on the robustness of our conclusions. Assessed independently (absolute results), this high amount of uncertainty is clearly visible on for each system under study, the results on some indicators can significantly vary (see supplementary materials Figure B-4). However the systems under study are quite similar and use the same background processes (for instance, they are made from the same materials, coming from many common suppliers ...), so most of the uncertainty linked to those processes can be considered equals. As the objective of this study is a comparative LCA, dependent sampling were used. Figure 4-7 illustrate the propagation of uncertainty in the midpoint results when comparing conventional concrete to Glass-UHPC. It shows that despite a great absolute uncertainty of both model, our conclusion remains solid for most midpoint. Regarding IR, RE-ORG and NRW, the confidence in our conclusion remains steady (greater than 80% on the preferred scenario). A more detailed and refined model of the production of the main contributor in those midpoint, PVA fiber, to improve the data quality could reduce this variability.



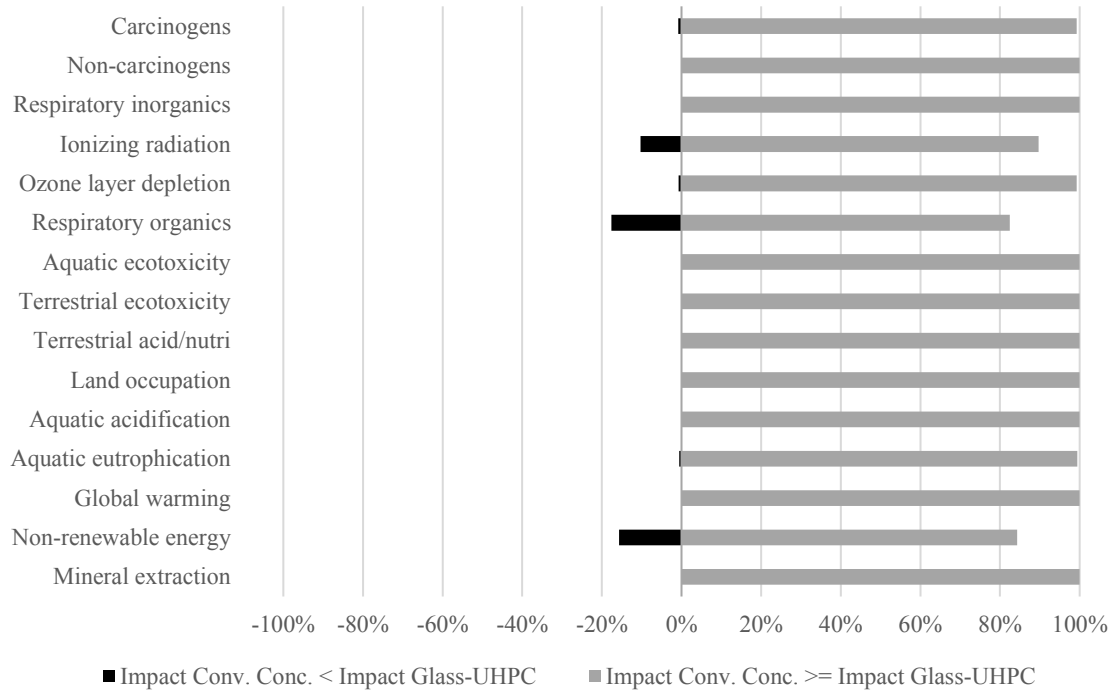


Figure 4-7 Results on Impact 2002+ midpoint indicators of the Monte Carlo analysis between conventional concrete and Glass-UHPC (confidence interval: 0.95; 5000 iterations)

## 4.6. Conclusions and outlook

The use of glass powder as SCM combines the benefit of being a low environmental impact material and of improving the strength and concrete durability. Our results confirm that comparing concretes only based on the volume can mislead the conclusions of the analysis. In our case study, the large majority of impacts has been lowered by at least 11% when comparing a standard Conv-UHPC with a conventional concrete, and by at least 20% when comparing the Glass-UHPC with the conventional concrete. Nevertheless, as the sensitivity analysis highlights, those results highly depends on the service life assumed for each concrete and the functional unit used. Despite a high intrinsic uncertainty among the system under study, the Monte Carlo simulation shows a clear confidence in the conclusion that Glass-UHPC has a better environmental impact than conventional concrete.

The development of concrete mix design with high strength capacity and high durability seems to shift the usual main contributors like cement and steel to the new materials used

to improve its performance (fibers, silica fume, glass powder...). But the environmental footprint of those new materials suffers from a lack of knowledge and needs to be investigated more in further studies to improve the accuracy of concrete's LCA.

Last but not least, the growing interest behind the glass powder could change the economic value of mix-glass waste into a valuable material, and thus, jeopardize the allocation made in this study. Moreover, a massive use of glass powder as a SCM (as well as any other SCM) raises the question of its impact on the economic market of cement or SCM. This question should be addressed in a consequential life cycle assessment investigating the consequences of recycled glass powder's commercialization on a larger scale.

# CHAPITRE 5. CONCLUSION

## 5.1. Sommaire et contributions

L'objectif principal de ce projet de recherche est d'évaluer l'impact environnemental du principe d'économie circulaire en boucle ouverte à l'aide de la méthodologie d'ACV, dans le cas de l'utilisation de poudre de verre recyclé dans le béton en tant qu'ajout cimentaire. Grace aux analyses du cycle de vie des deux études de cas présentées, il est possible d'affirmer que l'utilisation du principe d'économie circulaire en boucle ouverte pour le recyclage du verre dans le béton en tant qu'ajout cimentaire apporte un bénéfice de l'impact environnemental, en comparaison à des bétons plus conventionnels.

Dans le cas de bétons de même classe, cette réduction est en majeure partie attribuable à la diminution de la teneur en ciment. En accord avec la littérature, la production du ciment apparaît comme le principal contributeur de nombreux indicateurs. On note particulièrement la contribution des émissions issues des cheminées de cimenteries dans les problèmes d'émissions de GES, d'acidification et d'effets respiratoires. On note aussi la contribution de l'exploitation du charbon, principal carburant des fours à ciment, dans les problèmes d'écotoxicité et d'eutrophisation. Dans le cas de bétons de classes différentes, comme les bétons à ultra hautes performances, les gains environnementaux ne sont visibles que si l'on prend en compte le gain en durabilité des bétons ainsi créé. Ceci se traduit par une prise en compte de l'application envisagée lors de la définition de l'unité fonctionnelle. En effet, les bétons à ultra haute performance ont des teneurs en ciment bien plus élevées que des bétons traditionnels. La durée de vie effective des ouvrages est donc un paramètre clé de la performance environnementale du béton. Dans le cas de la passerelle piétonne, cependant, même dans le cas d'hypothèses très optimistes pour le béton conventionnel (75 ans) et pessimistes pour les bétons à ultra hautes performances (100 ans), les bétons à ultra hautes performances conservent leurs avantages environnementaux. Au regard des autres contributions, il est notable que, dans le cas des bétons ultra hautes performances, les matériaux techniques rajoutés à la formulation du béton, tels que les fibres de PVA, ou encore la fumée de silice, peuvent s'avérer lourds d'impacts sur certains indicateurs environnementaux.

Comme le soulignent les deux cas d'étude, l'impact environnemental de la fabrication de la poudre de verre est bien inférieur à celui du ciment. Sa contribution est à peine remarquable sur l'ensemble du cycle de vie du béton (inférieur à 8%). Son profil environnemental est partagé entre deux principaux contributeurs, la production de l'énergie nécessaire pour transformer le verre en une fine poudre, et les émissions liées au transport. Cependant, il est important de rappeler que ce résultat ne s'applique que dans un contexte québécois. En effet, l'énergie électrique utilisée est largement issue de l'hydroélectricité, ce qui contribue grandement à en minimiser l'impact.

En addition aux deux articles présentés dans ce mémoire, l'ensemble des travaux a été présenté lors de divers événements, permettant la diffusion du projet de recherche. La liste suivante dresse les différentes contributions :

- Deschamps J., Tagnit-Hamou A. and Amor B. 2018. Is open-loop recycling the lowest preference in a circular economy? Answering through LCA of glass powder in concrete. Présentation orale. LCIC 2018, Berlin, Allemagne. 29-30 Août 2018.
- Deschamps J., Tagnit-Hamou A., Fournier B. and Amor B. 2017. Life cycle assessment of the use of recycled glass as supplementary cementitious materials. Présentation orale et article de conférence. 10<sup>th</sup> ACI/RILEM International Conference on Cementitious Materials and Alternative Binders for Sustainable Concrete, SUPP-320-28, Montréal, Canada. 2-4 Octobre 2017.
- Deschamps J., Balint S., Tagnit-Hamou A. and Amor B. 2017. How circular economy can benefit to the concrete sector environmental impacts? Présentation orale. ACLCA XVII, Portsmouth, NH, États-Unis. 3-5 Octobre 2017.
- Tagnit-Hamou A., Soliman N., Zidol A., Deschamps J. and Ahmed O. 2017. Performance of ground-glass pozzolan in CC, HPC, and UHPC. Papier de conférence. 2ieme Congrès International Matériaux & Stabilité Structurale Matériaux, Rabat, Maroc, 6pp. 22-25 Novembre 2017.
- Deschamps J. 2016. Vers un béton plus verre ? Post de vulgarisation scientifique. <http://www.sciencepresse.qc.ca/blogue/2016/10/17/vers-beton-plus-verre>. Agence Science Presse. 17 Octobre 2016.

## 5.2. Travaux futurs

A la lumière des travaux effectués, il est possible d'affirmer que l'utilisation du verre recyclé dans le béton présente un avantage environnemental certain, pour différents types de bétons. Cependant, plusieurs limitations peuvent ouvrir à d'autres travaux permettant d'investiguer plus en détail la question.

La première limitation, qui est évoquée précédemment, est la limitation de ces résultats au contexte québécois. Un contexte très particulier car fournissant une énergie électrique en large majorité issue des barrages hydroélectriques, peu impactant sur l'environnement, en comparaison au charbon par exemple.

La deuxième limitation de cette étude est évoquée dans le premier article et a trait à l'utilisation des ressources. Malgré l'apparente abondance des matières premières composant le béton (sable, eau, calcaire et agrégat), l'exploitation intensive de ces dernières, nécessaire pour répondre à une demande mondiale exponentielle, peut avoir des effets néfastes. Cependant, comme le démontre Habert et ses collègues [109], les méthodologies de calculs d'impacts utilisées dans les études d'ACV ne permettent pas de prendre en compte l'impact de la consommation des ressources propres à l'industrie du béton. À titre d'exemple, la méthodologie IMPACT 2002+ ne considère pas, dans l'indicateur de déplétion des minerais, l'impact lié à la surconsommation du sable, des gravats ou du calcaire. Le développement d'un indicateur de déplétion des matériaux adapté au contexte du béton semble une lacune scientifique à combler.

La troisième limitation de cette étude concerne le caractère attributionnel de l'ACV effectuée. En effet, il n'a pas été question de prendre en compte les conséquences que pourrait entraîner la mise sur le marché à grande échelle d'un nouvel ajout cimentaire. D'autant plus si cette mise sur le marché s'accompagne d'incentives gouvernementales favorables. Tel un pavé lancé dans une mare qui éclabousse et modifie l'équilibre de l'étang, ce nouveau produit va perturber l'équilibre des marchés des ciments ainsi que de ses dérivés. On peut, par exemple, supposer qu'une partie du ciment produit au Québec

devra être exporté pour combler un autre marché. L'analyse des incidences environnementales de ces changements pourrait être effectuée dans une analyse de cycle de vie dite « conséquentielle ».

Enfin, les travaux effectués ne permettent pas non plus de clore le débat de la gestion du verre recyclé au Québec. Il serait en effet pertinent de prendre du recul et d'étudier plus en détail les différents débouchés existants pour le recyclage du verre, d'en connaître les exigences de qualité et les volumes concernés. De mettre en compétition le système actuel de tri du verre avec d'autres alternatives (une consigne, une nouvelle technologie de tri plus performante) et leurs capacités à répondre aux standards de qualité et de quantité des différents débouchés, qu'ils concernent une boucle fermée, comme la fabrication de nouveau verre, ou une boucle ouverte, comme l'utilisation de poudre dans le béton, dans la laine de verre ou les systèmes de filtration. Une telle approche globale apportera un éclairage pertinent et riche d'enseignements, afin de pouvoir optimiser d'un point de vue environnemental une problématique que rencontrent de nombreuses municipalités et gouvernements à travers le monde, la gestion des matières résiduelles.

## RÉFÉRENCES :

- [1] J. S. Mulrow, S. Derrible, W. S. Ashton, and S. S. Chopra, “Industrial Symbiosis at the Facility Scale,” *J. Ind. Ecol.*, vol. 21, no. 3, pp. 559–571, 2017.
- [2] B. Simon, M. Ben Amor, and R. Földényi, “Life cycle impact assessment of beverage packaging systems: Focus on the collection of post-consumer bottles,” *J. Clean. Prod.*, vol. 112, pp. 238–248, 2015.
- [3] R. Idir, M. Cyr, and A. Tagnit-Hamou, “Pozzolanic properties of fine and coarse color-mixed glass cullet,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 33, no. 1, pp. 19–29, 2011.
- [4] “Global Footprint Network.” [Online]. Available: <https://www.footprintnetwork.org/our-work/ecological-footprint/>. [Accessed: 19-Mar-2018].
- [5] OECD- Centre for Opportunity and Equality (COPE), “The squeezed middle class in OECD and emerging countries – myth and reality,” 2016.
- [6] D. H. Meadows, D. L. Meadows, J. Randers, and W. W. Behrens III, “The Limits to Growth,” 1972.
- [7] E. F. Schumacher, *Small is Beautiful : Economics as if People Mattered*. 1973.
- [8] G. H. Brundtland, “Rapport Brundtland,” 1987.
- [9] S. Sauvé, D. Normandin, and M. McDonald, *L'Économie Circulaire - Une transition incontournable*. 2016.
- [10] Ellen Macarthur Foundation, “Towards a Circular Economy: Business Rationale for an Accelerated Transition,” 2015.
- [11] W. McDowall *et al.*, “Circular Economy Policies in China and Europe,” *J. Ind. Ecol.*, vol. 21, no. 3, pp. 651–661, 2017.
- [12] European Commision, “An EU action plan for the circular economy,” *Com*, vol. 614, p. 21, 2015.
- [13] Gouvernement du Québec, “Dévelo,” 2011.
- [14] M. Wolf and K. Chomkhamisri, “The ‘ Integrated formula ’ for modelling recycling , energy recovery and reuse in LCA White paper,” no. October, 2014.
- [15] T. G. J. L. Williams, O. Heidrich, and P. J. Sallis, “Resources , Conservation and Recycling A case study of the open-loop recycling of mixed plastic waste for use in a sports-field drainage system,” *Resources, Conserv. Recycl.*, vol. 55, no. 2, pp. 118–128, 2010.

- [16] Recyc-Québec, “Mise En Contexte : Charte Des Matières.”
- [17] R. Laroche Paquet, “OPTIMISER LA RÉCUPÉRATION, LE TRI ET LA COMMERCIALISATION DES MATIÈRES RECYCLABLES AU QUÉBEC,” Sherbrooke University, 2015.
- [18] Recyc-Québec, “Indice du prix des matières (moyenne),” 2017.
- [19] Recyc-Québec, “Bilan 2015 de la gestion des matières résiduelles au Québec,” 2015.
- [20] A.-C. Desplanques, “86 % du verre récupéré finit à la poubelle,” *Le journal de Montréal*, 05-Feb-2018.
- [21] C. Côté, “Du verre récupéré inutilisable,” *La Presse*, 28-Oct-2014.
- [22] H. Ouellette-Vézina, “Une pétition pour consigner le verre au Québec,” *Le soleil*, 11-Mar-2018.
- [23] A. Mathieu, “Le verre, un casse-tête pour la Ville de Québec,” *Le soleil*, 2012.
- [24] A. Caillou, “Le verre, la bête noire du recyclage au Québec,” *Le devoir*, 05-Sep-2017.
- [25] E. L. Tucker, C. C. Ferraro, S. J. Laux, and T. G. Townsend, “Economic and life cycle assessment of recycling municipal glass as a pozzolan in portland cement concrete production,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 129, no. July 2017, pp. 240–247, 2018.
- [26] M. Behera, S. K. Bhattacharyya, A. K. Minocha, R. Deoliya, and S. Maiti, “Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete - A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 68, pp. 501–516, 2014.
- [27] R. Sharma and P. P. Bansal, “Use of different forms of waste plastic in concrete - A review,” *J. Clean. Prod.*, vol. 112, pp. 473–482, 2016.
- [28] L. Gu and T. Ozbakkaloglu, “Use of recycled plastics in concrete: A critical review,” *Waste Manag.*, vol. 51, pp. 19–42, 2016.
- [29] C. Johnston, “Waste glass as coarse aggregate for concrete,” *J. Test. Eval.*, vol. 2, no. 5, pp. 344–350, 1974.
- [30] T. E. Stanton, “No Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate,” in *The American Society of Civil Engineering*, 1940, pp. 22–26.
- [31] L. Charpin, “Modèle micromécanique pour l’étude de l’anisotropie de la réaction alcali-silice,” 2013.
- [32] W. Jin, C. Meyer, and S. Baxter, “‘Glasscrete’-concrete with glass aggregate,” *ACI*



*Mater. J.*, vol. 97, no. 2, pp. 208–213, 2000.

- [33] Y. Shao, T. Lefort, S. Moras, and D. Rodriguez, “Studies on concrete containing ground waste glass,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, no. 1, pp. 91–100, 2000.
- [34] C. Shi, Y. Wu, C. Riefler, and H. Wang, “Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, no. 5, pp. 987–993, 2005.
- [35] A. Shayan and A. Xu, “Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 36, no. 3, pp. 457–468, 2006.
- [36] N. Schwarz, H. Cam, and N. Neithalath, “Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 30, no. 6, pp. 486–496, 2008.
- [37] A. Zidol, M. T. Tognonvi, and A. Tagnit-Hamou, “Effect of Glass Powder on Concrete Sustainability,” *New J. Glas. Ceram.*, vol. 07, no. 02, pp. 34–47, 2017.
- [38] O. Jolliet, M. Saadé-Sbeih, S. Shanna, A. Jolliet, and P. Crettaz, *Environmental Life Cycle Assessment*. 2016.
- [39] ISO 14040, *Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*, no. 2006-07–01. 2006.
- [40] ISO 14044, “Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines,” vol. 3, pp. 1–47, 2006.
- [41] “Ecoinvent Database,” 2015. .
- [42] I. International Energy Agency, “Technology Roadmap,” *SpringerReference*, 2018.
- [43] P. Van den Heede and N. De Belie, “Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and ‘green’ concretes: Literature review and theoretical calculations,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 34, no. 4, pp. 431–442, 2012.
- [44] N. A. Madloul, R. Saidur, M. S. Hossain, and N. A. Rahim, “A critical review on energy use and savings in the cement industries,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 4, pp. 2042–2060, 2011.
- [45] D. R. Vieira, J. L. Calmon, and F. Z. Coelho, “Life cycle assessment (LCA) applied to the manufacturing of common and ecological concrete: A review,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 124, pp. 656–666, 2016.
- [46] M. Jiang, X. Chen, F. Rajabipour, and C. T. Hendrickson, “Comparative Life Cycle Assessment of Conventional, Glass Powder, and Alkali-Activated Slag Concrete and Mortar,” *J. Infrastruct. Syst.*, vol. 20, no. 4, p. 04014020, 2014.

- [47] P. Gursel, E. Masanet, A. Horvath, and A. Stadel, "Life-cycle inventory analysis of concrete production: A critical review," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 51, pp. 38–48, 2014.
- [48] A. Josa, A. Aguado, A. Cardim, and E. Byars, "Comparative analysis of the life cycle impact assessment of available cement inventories in the EU," *Cem. Concr. Res.*, vol. 37, no. 5, pp. 781–788, 2007.
- [49] A. Bosoaga, O. Masek, and J. E. Oakey, "CO<sub>2</sub> Capture Technologies for Cement Industry," *Energy Procedia*, vol. 1, no. 1, pp. 133–140, 2009.
- [50] J. S. Damtoft, J. Lukasik, D. Herfort, D. Sorrentino, and E. M. Gartner, "Sustainable development and climate change initiatives," *Cem. Concr. Res.*, vol. 38, no. 2, pp. 115–127, 2008.
- [51] M. B. Ali, R. Saidur, and M. S. Hossain, "A review on emission analysis in cement industries," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 5, pp. 2252–2261, 2011.
- [52] A. Josa, A. Aguado, A. Heino, E. Byars, and A. Cardim, "Comparative analysis of available life cycle inventories of cement in the EU," *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, no. 8, pp. 1313–1320, 2004.
- [53] C. Chen, G. Habert, Y. Bouzidi, and a. Jullien, "Environmental impact of cement production: detail of the different processes and cement plant variability evaluation," *J. Clean. Prod.*, vol. 18, no. 5, pp. 478–485, 2010.
- [54] B. Von Bahr, O. J. Hanssen, M. Vold, G. Pott, E. Stoltenberg-Hansson, and B. Steen, "Experiences of environmental performance evaluation in the cement industry. Data quality of environmental performance indicators as a limiting factor for benchmarking and rating," *J. Clean. Prod.*, vol. 11, no. 7, pp. 713–725, 2003.
- [55] J. Oliver-Solà, A. Josa, J. Rieradevall, and X. Gabarrell, "Environmental optimization of concrete sidewalks in urban areas," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 14, no. 4, pp. 302–312, May 2009.
- [56] S. Dean, M. Marceau, and M. VanGeem, "Comparison of the Life Cycle Assessments of an Insulating Concrete Form House and a Wood Frame House," *J. ASTM Int.*, vol. 3, no. 9, p. 13637, 2006.
- [57] C. Meyer, "The greening of the concrete industry," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 31, no. 8, pp. 601–605, 2009.
- [58] M. U. Hossain, C. S. Poon, Y. H. Dong, and D. Xuan, "Evaluation of environmental impact distribution methods for supplementary cementitious materials," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, no. September 2017, pp. 597–608, 2018.
- [59] F. Blomsma and G. Brennan, "The emergence of circular economy: a new framing around prolonging resource productivity," *J. Ind. Ecol.*, vol. 00, no. 0, 2017.

- [60] M. Geissdoerfer, P. Savaget, N. M. P. Bocken, and E. J. Hultink, “The Circular Economy – A new sustainability paradigm?,” *J. Clean. Prod.*, vol. 143, pp. 757–768, 2017.
- [61] Recyc-Québec, *Caractérisation des matières résiduelles du secteur résidentiel*. 2015.
- [62] S. Charron, *Bilan 2012 Recyc-Québec*. 2012.
- [63] N. Schwarz and N. Neithalath, “Influence of a fine glass powder on cement hydration: Comparison to fly ash and modeling the degree of hydration,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 38, no. 4, pp. 429–436, 2007.
- [64] S. Lemmet, “Buildings and Climate Change,” *Unep*, 2013.
- [65] C. A. Tsiliyannis, “Industrial Wastes and By-products as Alternative Fuels in Cement Plants: Evaluation of an Industrial Symbiosis Option,” *J. Ind. Ecol.*, vol. 00, no. 0, 2017.
- [66] M. Haupt and M. Zschokke, “How can LCA support the circular economy?,” in *63rd discussion forum on life cycle assessment, Zurich, Switzerland*, 2016.
- [67] E. Iacovidou *et al.*, “Metrics for optimising the multi-dimensional value of resources recovered from waste in a circular economy: A critical review,” *J. Clean. Prod.*, vol. 166, pp. 910–938, 2017.
- [68] M. Haupt, C. Vadenbo, and S. Hellweg, “Do We Have the Right Performance Indicators for the Circular Economy?: Insight into the Swiss Waste Management System,” *J. Ind. Ecol.*, vol. 21, no. 3, pp. 615–627, 2017.
- [69] R. Saad, F. Charron-Doucet, and E. Clément, “Analyse environnementale du cycle de vie de projets de commercialisation du verre mixte récupéré via des centres de tri de matières recyclables au Québec,” 2015.
- [70] S. Huysman *et al.*, “The recyclability benefit rate of closed-loop and open-loop systems: A case study on plastic recycling in Flanders,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 101, pp. 53–60, 2015.
- [71] J. M. F. Mendoza, J. Oliver-Solà, X. Gabarrell, J. Rieradevall, and A. Josa, “Planning strategies for promoting environmentally suitable pedestrian pavements in cities,” *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 17, no. 6, pp. 442–450, Aug. 2012.
- [72] J. M. F. Mendoza, J. Oliver-Solà, X. Gabarrell, A. Josa, and J. Rieradevall, “Life cycle assessment of granite application in sidewalks,” *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 17, no. 5, pp. 580–592, Mar. 2012.
- [73] B. Rajani, “Best Practices for Concrete Sidewalk Construction,” *Constr. Technol.*

*Updat.*, vol. 54, Jun. 2002.

- [74] G. Wernet, C. Bauer, B. Steubing, J. Reinhard, E. Moreno-ruiz, and B. Weidema, "The ecoinvent database version 3 ( part I ): overview and methodology," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 3, pp. 1218–1230, 2016.
- [75] *Emission Calculator (small engines)*. Raleigh, NC: N.C. Division of Air Quality, 2012.
- [76] G. P. T. M. van Santvoort, *Geotextiles and Geomembranes in Civil Engineering*. CRC Press, 1994.
- [77] ecoinvent, "Allocation cut-off by classification," 2017. [Online]. Available: <http://www.ecoinvent.org/database/system-models-in-ecoinvent-3/cut-off-system-model/allocation-cut-off-by-classification.html>. [Accessed: 27-Jan-2017].
- [78] O. Jolliet *et al.*, "IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 8, no. 6, pp. 324–330, 2003.
- [79] J. Bare, "TRACI 2.0: The tool for the reduction and assessment of chemical and other environmental impacts 2.0," *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 13, no. 5, pp. 687–696, 2011.
- [80] A. Lautier, R. K. Rosenbaum, M. Margni, J. Bare, P. O. Roy, and L. Deschênes, "Development of normalization factors for Canada and the United States and comparison with European factors," *Sci. Total Environ.*, vol. 409, no. 1, pp. 33–42, 2010.
- [81] EPA, "Background Information for Revised AP-42 Section 11.19.2, Crushed Stone Processing and Pulverized Mineral Processing," p. 50, 2003.
- [82] G. P. Peters, "Efficient algorithms for Life Cycle Assessment, Input-Output Analysis, and Monte-Carlo Analysis," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 12, no. 6, pp. 373–380, 2007.
- [83] B. P. Weidema and M. S. Wesnaes, "Data quality management for life cycle inventories - an example of using data quality indicators," *J. Clean. Prod.*, vol. 4, no. 3, pp. 167–174, 1996.
- [84] S. Muller, P. Lesage, A. Ciroth, C. Mutel, B. P. Weidema, and R. Samson, "The application of the pedigree approach to the distributions foreseen in ecoinvent v3," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 21, no. 9, pp. 1327–1337, 2016.
- [85] P. J. G. Henriksson, R. Heijungs, H. M. Dao, L. T. Phan, G. R. De Snoo, and J. B. Guinée, "Product carbon footprints and their uncertainties in comparative decision contexts," *PLoS One*, vol. 10, no. 3, pp. 1–11, 2015.
- [86] K. E. Seto, C. J. Churchill, and D. K. Panesar, "Influence of fly ash allocation

- approaches on the life cycle assessment of cement-based materials,” *J. Clean. Prod.*, vol. 157, pp. 65–75, 2017.
- [87] G. Habert and N. Roussel, “Study of two concrete mix-design strategies to reach carbon mitigation objectives,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 31, no. 6, pp. 397–402, 2009.
  - [88] G. Habert, D. Arribe, T. Dehove, L. Espinasse, and R. Le Roy, “Reducing environmental impact by increasing the strength of concrete: Quantification of the improvement to concrete bridges,” *J. Clean. Prod.*, vol. 35, pp. 250–262, 2012.
  - [89] M. U. Hossain, C. S. Poon, I. M. C. Lo, and J. C. P. Cheng, “Comparative environmental evaluation of aggregate production from recycled waste materials and virgin sources by LCA,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 109, pp. 67–77, 2016.
  - [90] T. Blankendaal, P. Schuur, and H. Voordijk, “Reducing the environmental impact of concrete and asphalt : a scenario approach,” *J. Clean. Prod.*, vol. 66, pp. 27–36, 2014.
  - [91] ISO 14044, *Management environnemental - Exigences et lignes directrices*. 2006.
  - [92] N. A. Soliman, A. F. Omran, and A. Tagnit-Hamou, “Laboratory characterization and field application of novel ultra-high-performance glass concrete,” vol. 113, no. 3, pp. 307–316, 2016.
  - [93] A. Tagnit-hamou, N. Soliman, A. F. Omran, M. T. Mousa, and N. Gauvreau, “Novel Ultra-High- Performance Glass Concrete,” no. march, pp. 41–48, 2015.
  - [94] M. Schmidt and E. Fehling, “Ultra-high-performance concrete: Research, development and application in Europe,” *Seventh Int. Symp. Util. High Strength/High-Performance Concr.*, pp. 51–78, 2005.
  - [95] T. Vande Voort, M. Suleiman, and S. Sriitharan, “Design and Performance Verification of Ultra-High Performance Concrete Piles,” 2008.
  - [96] E. C. Bentz and M. D. A. Thomas, “Life-365 Service Life Prediction Model: and Computer Program for Predicting the Service Life and Life-Cycle Cost of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides,” *Life-365 User Man.*, pp. 1–87, 2013.
  - [97] C. P. Gu, W. Sun, L. P. Guo, and Q. N. Wang, “Ultrahigh performance concrete: A potential material for sustainable marine construction in view of the service life,” *Appl. Mech. Mater.*, vol. 438–439, no. May, 2013.
  - [98] N. H. Yi, J. H. J. Kim, T. S. Han, Y. G. Cho, and J. H. Lee, “Blast-resistant characteristics of ultra-high strength concrete and reactive powder concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 28, no. 1, pp. 694–707, 2012.
  - [99] Recyc-Québec, “Indice du prix des matières (moyenne ),” pp. 3–5, 2014.

- [100] M. L. Marceau, M. a Nisbet, and M. G. VanGeem, “Life cycle inventory of Portland cement concrete,” no. 3007, 2007.
- [101] J. Prusinski, M. Marceau, and M. VanGeem, “Life cycle inventory of slag cement concrete,” ... *Pozzolans Concr.* ..., no. Lci, pp. 1–26, 2004.
- [102] C. Chen, G. Habert, Y. Bouzidi, A. Jullien, and A. Ventura, “LCA allocation procedure used as an incitative method for waste recycling: An application to mineral additions in concrete,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 54, no. 12, pp. 1231–1240, 2010.
- [103] P. Van den Heede, M. Maes, and N. De Belie, “Influence of active crack width control on the chloride penetration resistance and global warming potential of slabs made with fly ash + silica fume concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 67, pp. 74–80, 2013.
- [104] D. J. M. Flower and J. G. Sanjayan, “Green house gas emissions due to concrete manufacture,” *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 12, no. 5, pp. 282–288, 2007.
- [105] E. R. Teixeira, R. Mateus, A. F. Camões, L. Bragança, and F. G. Branco, “Comparative environmental life-cycle analysis of concretes using biomass and coal fly ashes as partial cement replacement material,” *J. Clean. Prod.*, vol. 112, 2015.
- [106] J.-F. Luc Vachon, K. Beaulne-Bélisle, J. Rosset, B. Gariépy, and K. McGrath, “Profil de la gestion des débris de construction , rénovation et démolition (CRD) au Québec,” p. 128, 2009.
- [107] J. Bare, “TRACI 2.1: User Manual,” *US Environ. Prot. Agency*, pp. 1–24, 2012.
- [108] J. Whitmore and P.-O. Pineau, “État de l’énergie au Québec,” p. 39, 2016.
- [109] G. Habert, Y. Bouzidi, C. Chen, and A. Jullien, “Development of a depletion indicator for natural resources used in concrete,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 54, no. 6, pp. 364–376, 2010.

# ANNEXE A : SUPPLEMENTARY MATERIAL: IS OPEN-LOOP RECYCLING THE LOWEST PREFERENCE IN A CIRCULAR ECONOMY? ANSWERING THROUGH LCA OF GLASS POWDER IN CONCRETE

More tables and figures are provided for a better understanding of the paper. This information is also crucial to the reproducibility of our work.

Tableau A-1 Inventory of the reference and glass powder concretes, for 1m<sup>3</sup> of concrete

	Ecoinvent dataset	Unit	BAU scenario	Glass scenario	Pedigree matrix
Concrete mixture	Cement, Portland {CA-QC}   production	kg	435	320	(1,1,2,2,2)
	Glass powder (Created data, see Table S6)	kg	0	80	(2,1,1,1,1)
	Tap water {CA-QC}   market	kg	175	168	(1,1,3,2,2)
	Sand {Row}   gravel and quarry operation <sup>1</sup>	kg	728	688	(1,1,1,3,4)
	Gravel, round {Row}   gravel and quarry operation <sup>1</sup>	kg	1007	1040	(1,3,3,4,4)
	Chemical, organic {GLO}   market	kg	1,1	0,634	(1,1,2,4,4)
	Fatty alcohol {GLO}   market	kg	0,546	0,179	(1,3,3,5,4)
Transportation	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 {GLO}   market	kgkm	4,69E+04	4,59E+04	(2,1,2,4,3)
Machinery and energy consumption <sup>2</sup>	Concrete mixing factory {GLO}   market	unit	4,57E-07	4,57E-07	(2,1,5,5,1)
	Synthetic rubber {GLO}   market	kg	7,13E-03	7,13E-03	(2,1,5,5,1)
	Lubricating oil {GLO}   market	kg	1,19E-02	1,19E-02	(2,1,5,5,1)
	Steel, low-alloyed, hot rolled {GLO}   market	kg	2,38E-02	2,38E-02	(2,1,5,5,1)
	Electricity, medium voltage {CA-QC}   market	kWh	4,11E+00	4,11E+00	(4,1,4,3,1)
	Heat, district or industrial, natural gas {CA-QC}   market	MJ	1,06E+01	1,06E+01	(1,1,4,1,1)
	Diesel, burned in building machine {GLO}   market	MJ	1,56E+01	1,56E+01	(1,1,4,1,1)
Output emissions to air <sup>2</sup>	Water/m3	m <sup>3</sup>	6,14E-03	6,14E-03	(1,1,4,1,1)
Output emissions to water <sup>2</sup>	Copper	kg	1,55E-08	1,55E-08	(2,1,4,3,1)
	Oils, unspecified	kg	2,32E-07	2,32E-07	(2,1,4,3,1)
	Chlorides, unspecified	kg	3,09E-09	3,09E-09	(2,1,4,3,1)
	Iron	kg	1,55E-08	1,55E-08	(2,1,4,3,1)
	Suspended solids, unspecified	kg	4,64E-07	4,64E-07	(2,1,4,3,1)
Output to technosphere <sup>2</sup>	Waste concrete {GLO}   market	kg	2,45E+01	2,45E+01	(2,1,4,3,1)
	Wastewater from concrete production {GLO}   market	kg	3,48E-02	3,48E-02	(2,1,4,3,1)

<sup>1</sup>Electricity and water usage adapted to Quebec context

<sup>2</sup>Data extracted from the ecoinvent dataset "concrete production 30-20Mpa, RNA only CA-QC"



Tableau A-2 Inventory of the construction process for one functional unit

	Ecoinvent dataset	Unit	Value	Pedigree matrix
Concrete mixte	Concrete production (see Table S1)	m <sup>3</sup>	0,2	(1,1,1,1,2)
Construction process	Excavation, hydraulic digger {RER}   processing	m <sup>3</sup>	9,3	(1,1,5,4,4)
	Soil compacting (Created data, see Table S3)	m <sup>2</sup>	2	(2,1,2,4,4)
	Pitch {ROW}   Petroleum refinery operation (Join)	kg	0,24	(2,1,1,4,4)
	Sawnwood, lath, softwood, raw, air dried {RoW} (Wooden formwork)	m <sup>3</sup>	0,005	(2,3,1,3,4)
Sub-base material	Polystyrene, extruded, CO2 blown {CA-QC}   market	kg	0,0525	(1,1,2,4,4)
	Geotextile Created data (see Table S4)	m <sup>2</sup>	1,1	(2,1,3,4,4)
	Gravel, round {Row}   gravel and quarry operation <sup>1</sup>	kg	457	(1,1,2,4,4)

<sup>1</sup>Electricity and water usage adapted to Quebec context

Tableau A-3 Inventory of 1m<sup>2</sup> of soil compacting process

	Ecoinvent dataset	Unit	Value
Energy	Petrol, unleaded {RoW}   market	kg	6,64E-01
Output emissions to air	Particulates, unspecified	kg	1,05E-03
	Sulfur dioxide	kg	8,58E-04
	Nitrogen oxides	kg	1,60E-02
	Carbon monoxide	kg	1,01E-02
	VOC, volatile organic compounds	kg	3,13E-02
	Acetaldehyde	kg	8,16E-06
	Formaldehyde	kg	1,26E-05
	Carbon dioxide, fossil	kg	1,45E+00
	Methane	kg	1,23E-03
	Dinitrogen monoxide	kg	3,65E-03

Tableau A-4 Inventory of 1m<sup>2</sup> of geotextile

	Ecoinvent dataset	Unit	Value
Material	Polypropylene, granulate {GLO}   market	kg	0,884
Process	Extrusion, plastic film {CA-QC}   production	kg	0,884

Tableau A-5 Transportation distances of materials and datasets used

Material	Transportation distance (in km)	Ecoinvent dataset
Cement	70	Transport, freight, train {US}   diesel
Glass powder	70	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 {GLO}   market
Sand	25	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 {GLO}   market
Coarse aggregate	25	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 {GLO}   market
Concrete	20	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 {GLO}   market

Tableau A-6 Inventory of the glass powder production process (values remain confidential)

	Ecoinvent dataset	Unit
Material	Unsorted waste glass	kg
	Limestone quarry infrastructure {CH}   limestone quarry construction	p
Energy / Heat	Electricity, medium voltage {CA-QC}   market	kWh
	Heat, district or industrial, natural gas {CA-QC}   market	MJ
Transportation (from landfill to factory)	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 {GLO}   market	kgkm
Output emission to air	Particulates, < 2.5 um	g
	Particulates, > 2.5 um, and < 10um	g

Tableau A-7 Physical properties differences between reference and glass powder containing concrete used for the sidewalk construction

	Unit	Reference concrete	Glass concrete
Compressive Strength	MPa	35.1	37.6
Tensile Strength	MPa	4.08	5.37
Torsion Resistance (flexural)	MPa	5.23	5.73
Resistance against Cl <sup>-</sup>	Coulomb	900	2600
		600	2200
		400	2000

Tableau A-8 Midpoints and endpoints results of the life cycle assessment for each scenario (IMPACT 2002+)

Impact category	Unit	BAU Sc.	GP Sc.	Sc. 1	Sc. 2	Sc. 3	Sc. 4
Carcinogens	kg C2H3Cl eq	9,81E-01	9,29E-01	1,12E+00	7,15E-01	9,29E-01	9,06E-01
Non-carcinogens	kg C2H3Cl eq	6,40E-01	5,35E-01	6,64E-01	4,11E-01	5,35E-01	5,17E-01
Respiratory inorganics	kg PM2.5 eq	1,12E-01	9,78E-02	1,30E-01	7,52E-02	9,80E-02	8,73E-02
Ionizing radiation	Bq C-14 eq	2,22E+02	2,13E+02	3,16E+02	1,64E+02	2,13E+02	1,96E+02
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	5,03E-06	4,79E-06	6,87E-06	3,69E-06	4,79E-06	4,39E-06
Respiratory organics	kg C2H4 eq	4,29E-02	4,14E-02	5,36E-02	3,19E-02	4,14E-02	3,94E-02
Aquatic ecotoxicity	kg TEG water	3,52E+03	2,95E+03	3,63E+03	2,27E+03	2,95E+03	2,83E+03
Terrestrial ecotoxicity	kg TEG soil	1,20E+03	1,05E+03	1,25E+03	8,09E+02	1,05E+03	9,97E+02
Terrestrial acid/nutri	kg SO2 eq	2,48E+00	2,11E+00	3,02E+00	1,62E+00	2,11E+00	1,99E+00
Land occupation	m2org.arable	3,21E+00	2,93E+00	3,40E+00	2,25E+00	2,93E+00	2,80E+00
Aquatic acidification	kg SO2 eq	6,41E-01	5,32E-01	6,73E-01	4,09E-01	5,32E-01	4,95E-01
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-lim	8,24E-03	6,91E-03	8,96E-03	5,32E-03	6,91E-03	6,67E-03
Global warming	kg CO2 eq	9,64E+01	7,71E+01	9,10E+01	5,93E+01	7,71E+01	7,50E+01
Non-renewable energy	MJ primary	7,39E+02	6,58E+02	8,60E+02	5,06E+02	6,58E+02	6,22E+02
Mineral extraction	MJ surplus	1,79E+00	1,64E+00	2,69E+00	1,26E+00	1,64E+00	1,57E+00
Human health	DALY	8,30E-05	7,27E-05	9,59E-05	5,59E-05	7,28E-05	6,53E-05
Ecosystem quality	PDF*m2*yr	1,57E+01	1,38E+01	1,69E+01	1,07E+01	1,38E+01	1,31E+01
Climate change	kg CO2 eq	9,64E+01	7,71E+01	9,10E+01	5,93E+01	7,71E+01	7,50E+01
Resources	MJ primary	7,41E+02	6,60E+02	8,63E+02	5,07E+02	6,60E+02	6,24E+02

Tableau A-9 Contribution of midpoint indicators to endpoints indicators (IMPACT 2002+)

	Human Health		Ecosystem Quality		Climate Change		Resources	
	BAU Sc.	GP Sc.	BAU Sc.	GP Sc.	BAU Sc.	GP Sc.	BAU Sc.	GP Sc.
Carcinogens	3,3%	3,6%	-	-	-	-	-	-
Non-carcinogens	2,2%	2,1%	-	-	-	-	-	-
Respiratory inorganics	94,4%	94,2%	-	-	-	-	-	-
Ionizing radiation	0,1%	0,1%	-	-	-	-	-	-
Ozone layer depletion	0,0%	0,0%	-	-	-	-	-	-
Respiratory organics	0,1%	0,1%	-	-	-	-	-	-
Aquatic ecotoxicity	-	-	1,1%	1,1%	-	-	-	-
Terrestrial ecotoxicity	-	-	60,3%	60,1%	-	-	-	-
Terrestrial acid/nutri	-	-	16,4%	15,8%	-	-	-	-
Land occupation	-	-	22,2%	23,0%	-	-	-	-
Global warming	-	-	-	-	100,0%	100,0%	-	-
Non-renewable energy	-	-	-	-	-	-	99,8%	99,8%
Mineral extraction	-	-	-	-	-	-	0,2%	0,2%

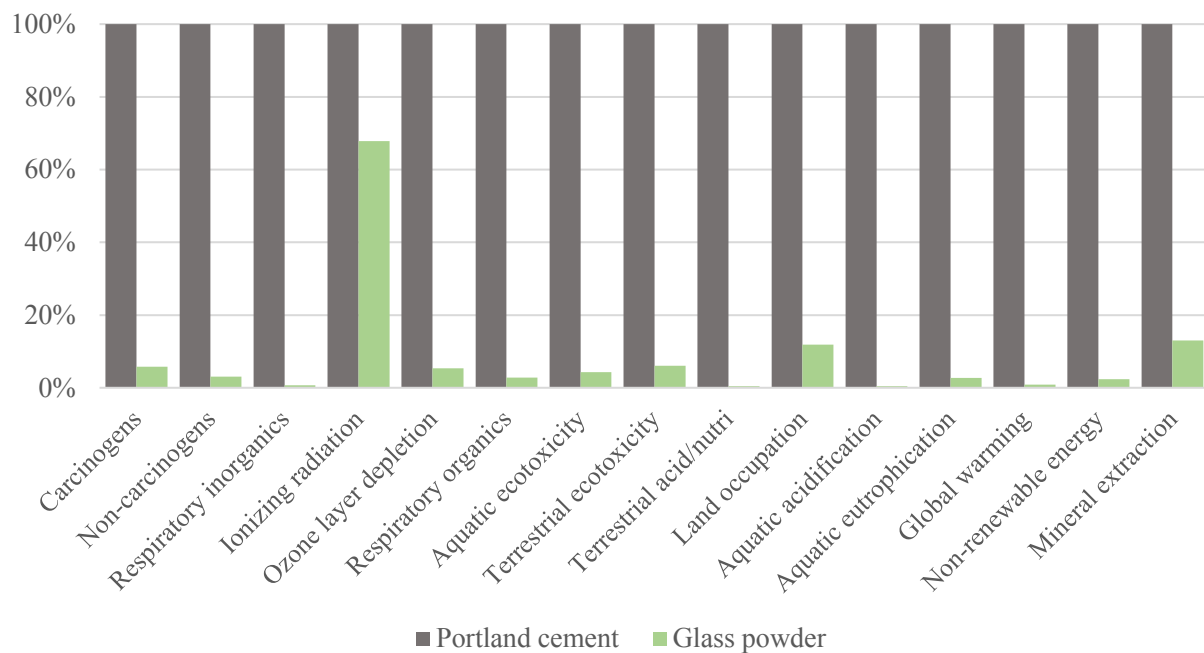


Figure A-1 Midpoint comparison between the production of 1kg of Portland cement and 1 kg of glass powder

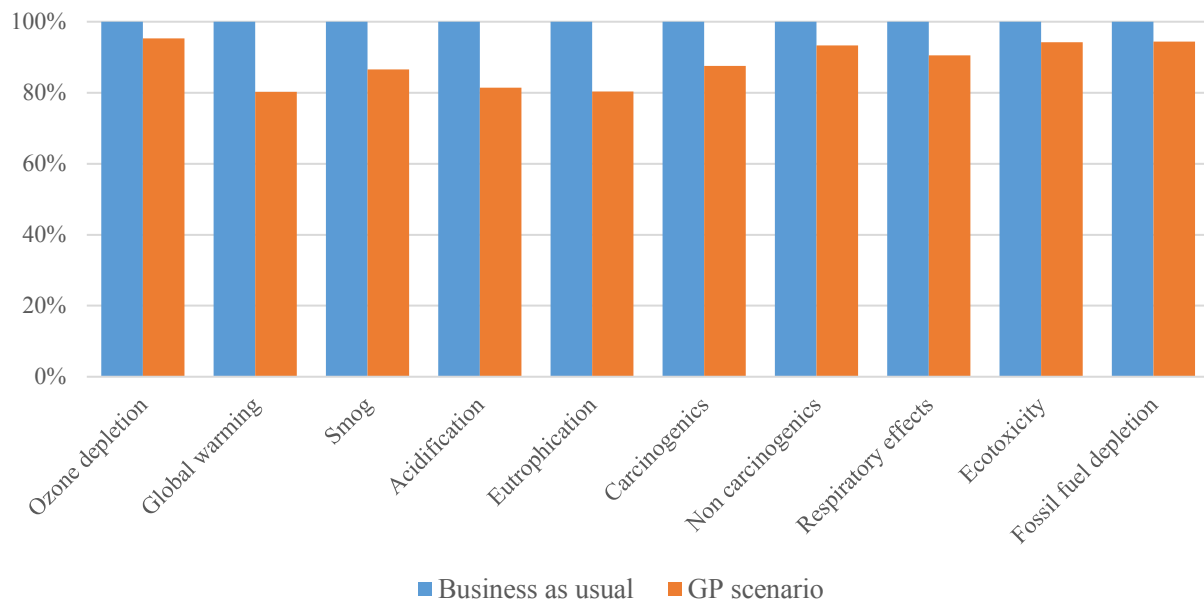


Figure A-2 TRACI V2.1 midpoint results comparison between business as usual and glass powder scenarios

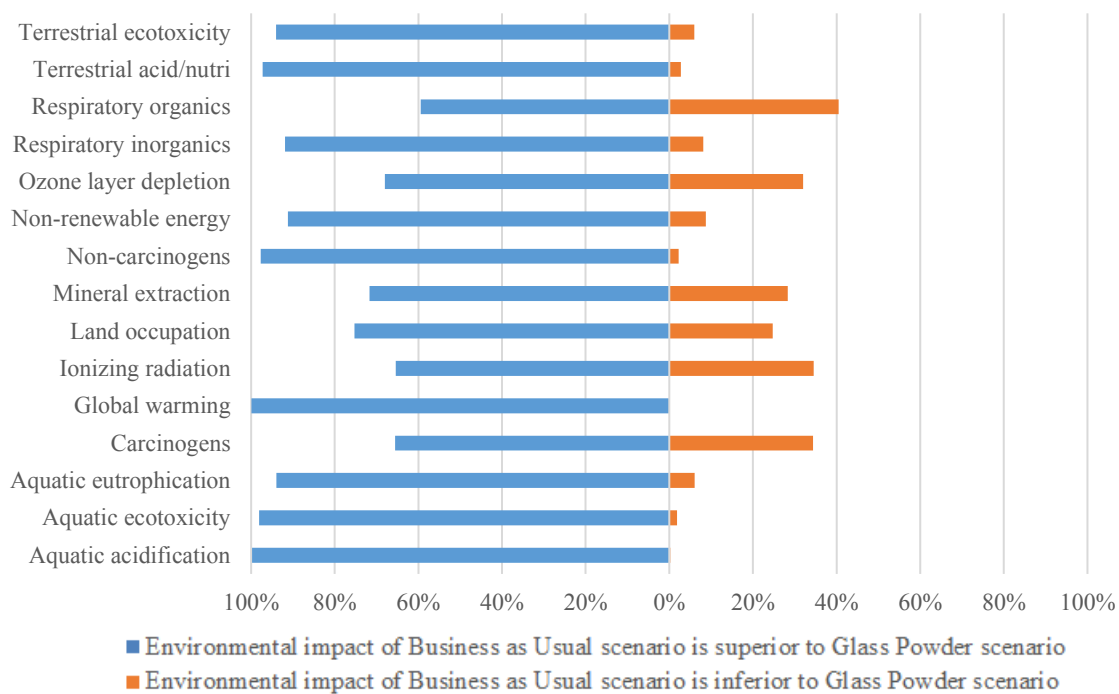


Figure A-3 Results on Impact 2002+ midpoint indicators of the Monte Carlos analysis (confidence interval = 0.95; iterations = 5000)

# ANNEXE B : SUPPLEMENTARY MATERIAL: LCA CASE STUDY OF ULTRA-HIGH PERFORMANCE CONCRETE USING GLASS POWDER AS SUPPLEMENTARY CEMENTITIOUS MATERIAL

Present document encompasses supporting information for better understanding of the study.

Tableau B-1 Midpoints and Endpoints impact categories of IMPACT 2002+

	Name	Abbreviation	Contribution to endpoint
MidPoints	Aquatic acidification	A-ACI	-
	Aquatic eutrophication	A-EUT	-
	Aquatic ecotoxicity	A-ECO	Ecosystem Quality
	Land occupation	LO	Ecosystem Quality
	Terrestrial acid/nutri	T-ACI/NUT	Ecosystem Quality
	Terrestrial ecotoxicity	T-ECO	Ecosystem Quality
	Carcinogens	CA	Human Health
	Non-carcinogens	N-CA	Human Health
	Ionizing radiation	IR	Human Health
	Ozone layer depletion	OLD	Human Health
	Respiratory inorganics	RE-INO	Human Health
	Respiratory organics	RE-O	Human Health
	Mineral extraction	ME	Resources
	Non-renewable energy	NRE	Resources
	Global warming	GW	Climate Change
EndPoints	Climate change	CC	-
	Ecosystem quality	EQ	-
	Human health	HH	-
	Resources	RE	-

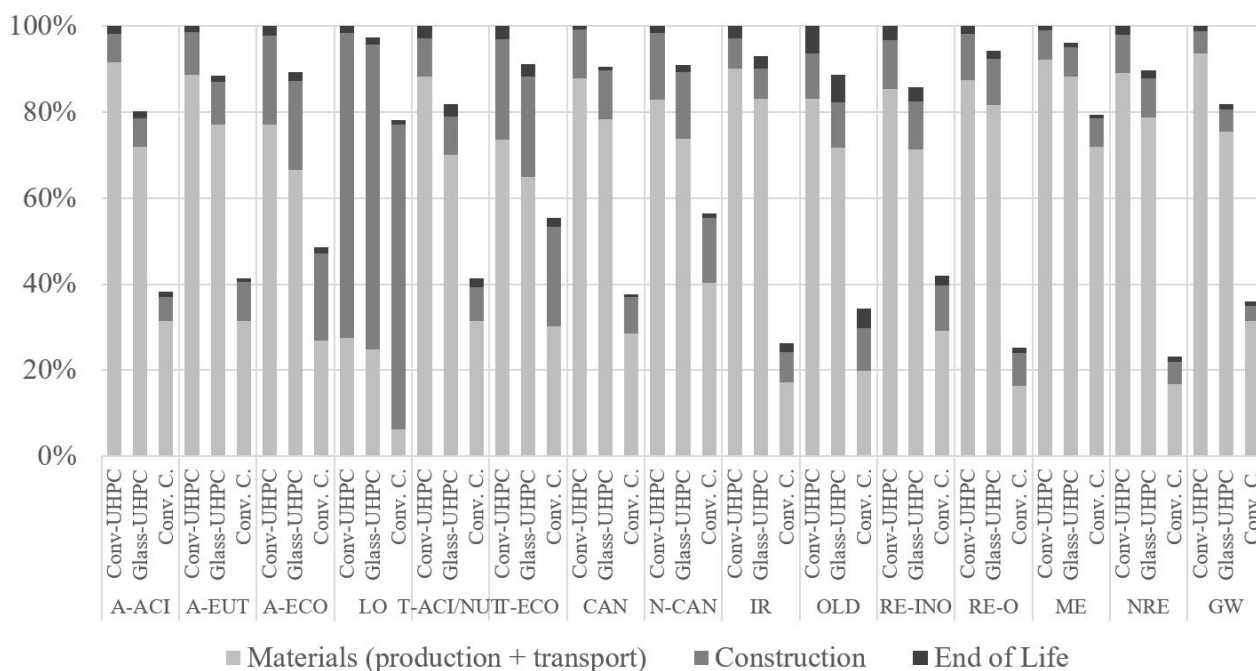


Figure B-1 Midpoints results of Conv-UHPC, Glass-UHPC and conventional concrete (Conv. C.), decks for the same volume (IMPACT 2002+)

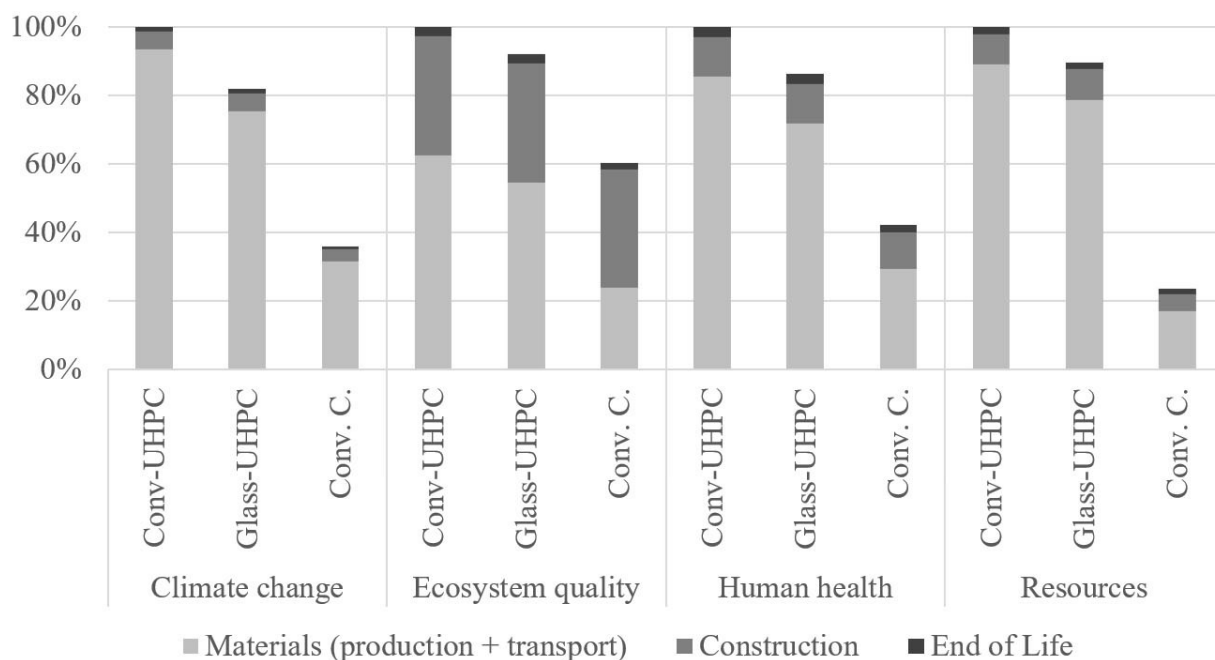


Figure B-2 Endpoints results of Conv-UHPC, Glass-UHPC and conventional concrete (Conv. C.), decks for the same volume (IMPACT 2002+)

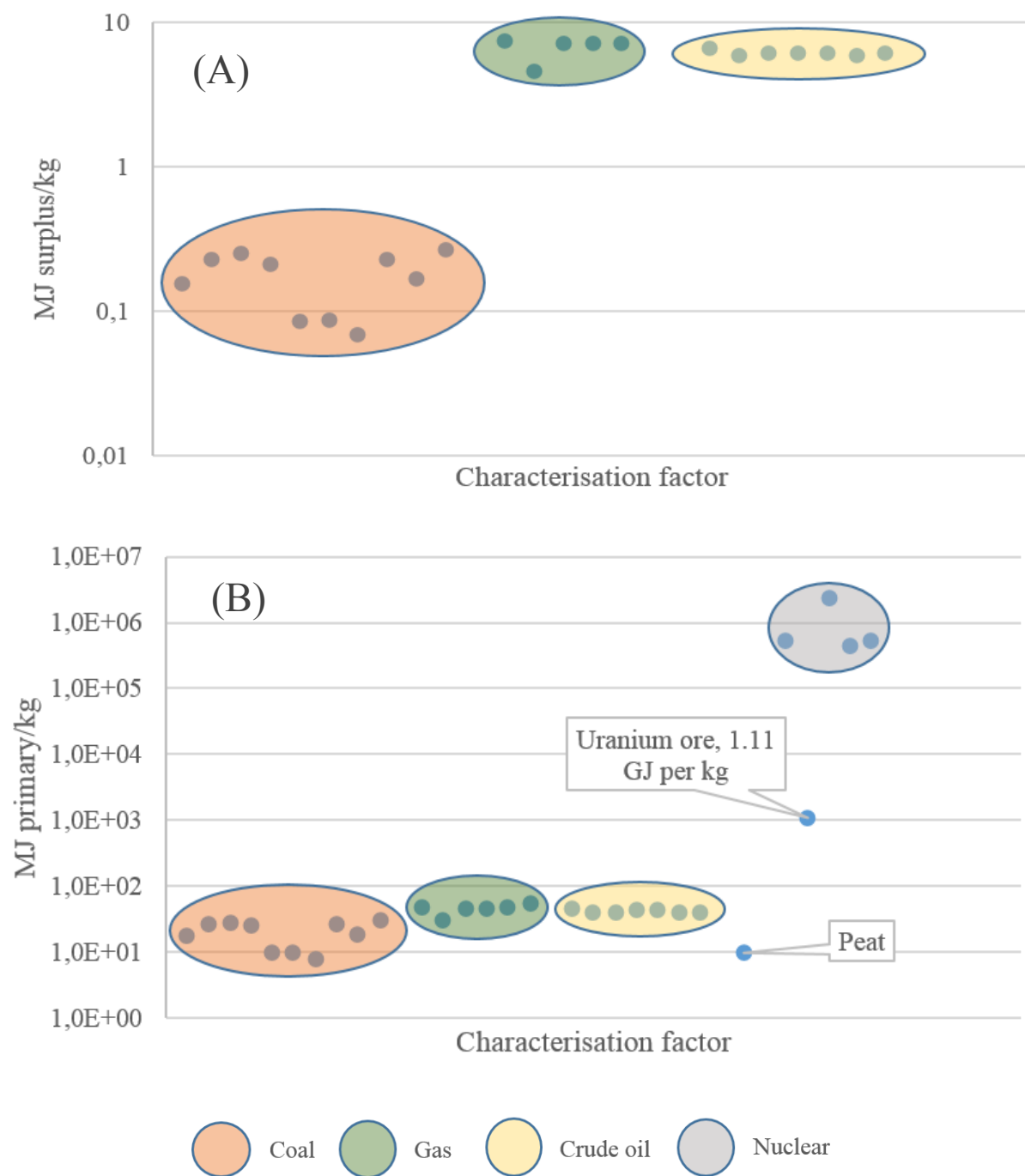


Figure B-3 Characterisation factor distribution for Fossil fuel depletion (A) and Non-renewable energy (B)



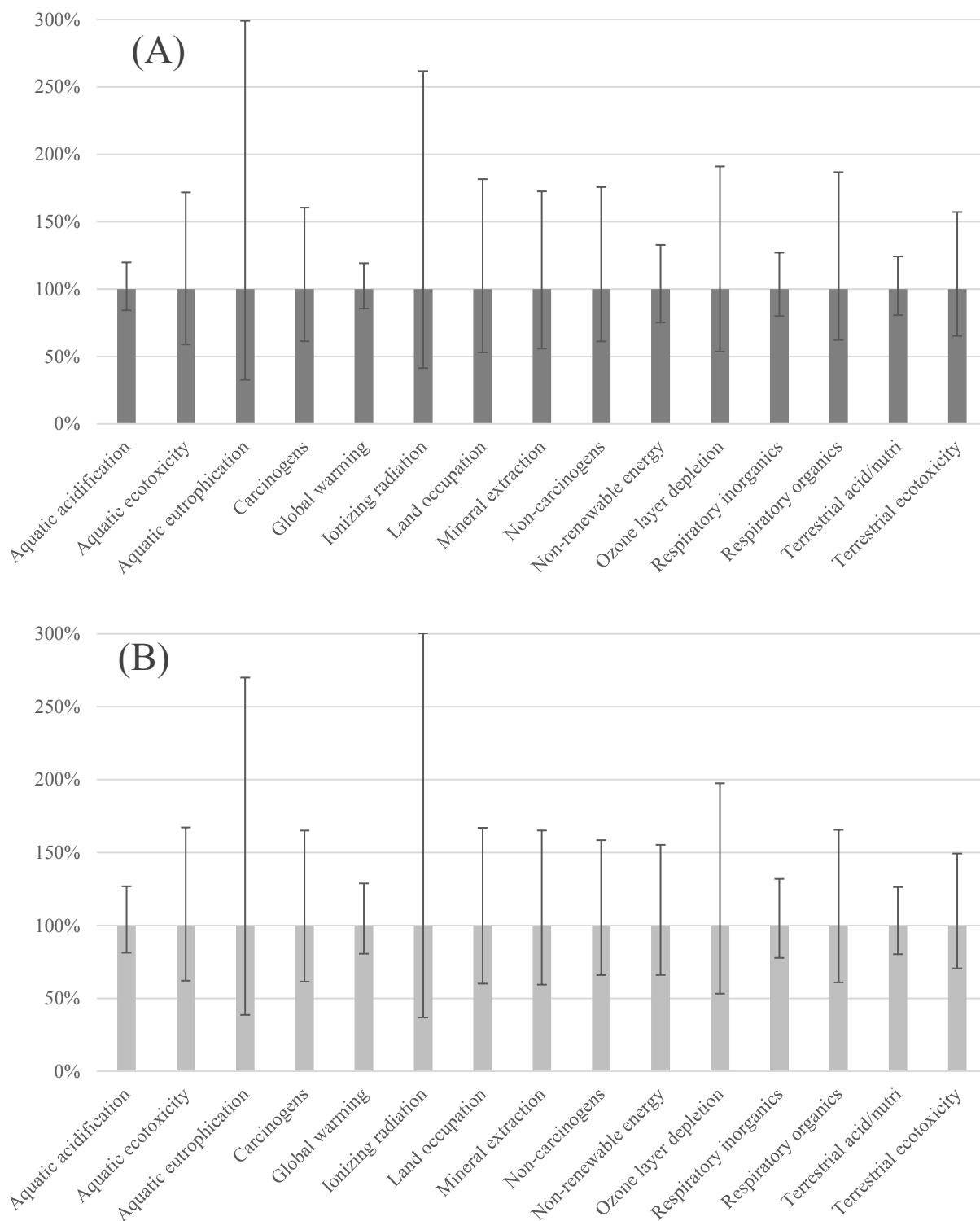


Figure B-4 Monte Carlo analysis on conventional concrete (A) and Glass-UHPC (B) on Impact 2002+ midpoint indicators (confidence interval: 0.95; 5000 iterations)